



M 2017

ACÚSTICA TRANSMISSÕES MARGINAIS NO EDIFÍCIO DO PORTO BURGUEÊS

JOSÉ ANTÓNIO LOPES DIAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA

À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
CONSTRUÇÕES

ACÚSTICA

TRANSMISSÕES MARGINAIS NO EDIFÍCIO DO PORTO BURGUEÊS

JOSÉ ANTÓNIO LOPES DIAS

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor Rui Manuel Gonçalves Calejo Rodrigues

Coorientador: Engenheira Dóris Mafalda Dias Queirós

JUNHO DE 2017

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2016/2017

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2016/2017 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2017*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus Pais e aos meus Avós

O importante não é vencer todos os dias, mas lutar sempre

Waldemar Valle Martins

AGRADECIMENTOS

Ao concluir este trabalho não posso deixar de expressar o meu reconhecido agradecimento a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Em primeiro lugar, agradeço a todos os elementos do grupo NI&DEA que me receberam sempre com simpatia no seu espaço de trabalho, em especial ao meu orientador, Professor Doutor Rui Calejo Rodrigues, e há minha coorientadora Engenheira Dóris Queirós, pelo acompanhamento, pela disponibilidade e pelas correções deste trabalho.

Do grupo NI&DEA, expresso também um agradecimento especial ao Engenheiro Nélson Pereira pelas várias disponibilizações do edifício estudado após a aquisição do mesmo, e já agora, à sua anterior proprietária, que me recebeu em sua casa de livre vontade e se prontificou a ajudar naquilo que fosse preciso.

De igual modo, expresso o meu sincero agradecimento à Professora Engenheira Elsa Caetano, pelo empréstimo dos equipamentos, assim como pelo tempo disponibilizado para o ensino do uso dos mesmos, e também ao seu colaborador, Engenheiro Fernando Bastos.

Por último, agradeço a todos os meus amigos e há minha família, que de uma forma geral contribuíram para a motivação da realização deste trabalho, em especial aos meus pais e aos meus avós, que me proporcionaram condições invejáveis para a realização deste curso e revelaram um apoio incondicional ao longo dos últimos anos.

A todos o meu sincero obrigado.

RESUMO

A acústica de edifícios tem vindo a ganhar importância ao longo dos anos com a necessidade e preocupação das pessoas em trabalhar e habitar em ambientes acusticamente confortáveis.

O edifício do Porto burguês apresenta hoje em dia um desafio importante aos projetistas de acústica uma vez que o recente cenário de reabilitação generalizada obriga a que soluções construtivas com mais de um século contribuam para um desempenho acústico atual.

Um dos aspetos centrais na reavaliação de soluções existentes e seu eventual reforço tem a ver com os contributos das transmissões marginais quer para isolamento a sons aéreos quer de percussão.

Este trabalho tem justamente como foco as transmissões ao longo dos elementos construtivos, denominadas de transmissões indiretas ou marginais a sons aéreos, em edifícios com soluções construtivas antigas.

A importância de discussão sobre o assunto diz respeito ao facto de os métodos correntes de análise destas transmissões terem sido desenvolvidos para soluções construtivas atuais e de se desconhecer a sua aplicabilidade em soluções antigas.

Através do recurso a um caso de estudo, procedeu-se à análise das transmissões marginais a sons aéreos, influenciadas pelas paredes de meiação do edifício em causa. O estudo foi feito recorrendo a um método comparativo no qual se avaliaram os resultados de $D_{nT,w}$ medidos “*in situ*”, os calculados de acordo com a norma específica e os calculados recorrendo à avaliação experimental dos coeficientes de transmissão marginal k_{ij} , cuja avaliação constitui um dos aspetos originais do presente trabalho.

Os resultados obtidos, que constam do Capítulo 7, permitiram chegar a conclusões satisfatórias no que respeita à questão de investigação subjacente a esta dissertação, ou seja:

– *É possível utilizar em edifícios antigos os métodos atualmente normalizados para cálculo de k_{ij} ?*

PALAVRAS-CHAVE: acústica, transmissões marginais, edifícios tradicionais, sons aéreos

ABSTRACT

Buildings acoustics have been gaining importance over the years with the need and concern of people to work and live in acoustically comfortable environments.

The bourgeois Porto building presents, nowadays, a major challenge to acoustic designers since the recent scenario of generalized rehabilitation makes construction solutions with more than a century contribute to a current acoustic performance.

One of the main aspects in the re-evaluation of existing solutions and their eventual reinforcement is related with the account of the contributions of the marginal transmissions, either for airborne isolation or percussion sounds.

This work has as main focus the transmissions along the constructive elements, named indirect or marginal transmissions, in old constructive solutions.

The importance of discussing the subject as to do with the current methods of analysis of the transmissions being developed for current constructive solutions and their application in old solutions is unknown.

Through the use of a case study, analyses were carried out for marginal transmissions to airborne sounds, influenced by the masonry walls of the building in question. The study was made using a comparative method of the results of evaluation of $D_{nT,w}$ measured "in situ", measured according to the norms and measured by experimental evaluation of marginal transmission coefficients k_{ij} , which are the focus of the present work.

The results obtained, which appear in Chapter 7, allow a satisfactory conclusion regarding the research question underlying this dissertation that is:

- Is it possible to use the currently standardized methods for calculating k_{ij} in old buildings?

KEYWORDS: acoustic, flanking, old building solutions, airborne sound.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
 1. INTRODUÇÃO	 1
1.1. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO	1
1.2. OBJETIVO E ÂMBITO	2
1.3. ORGANIZAÇÃO	3
 2. ESTADO DE ARTE	 5
2.1. NOÇÕES GERAIS	5
2.1.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO	5
2.1.2. ABSORÇÃO SONORA	6
2.1.3. DIFUSÃO	7
2.1.4. SONS AÉREOS	7
2.1.5. SONS DE PERCUSSÃO	9
2.1.6. TRANSMISSÕES MARGINAIS	9
2.2. SÍNTESE DO CONHECIMENTO	10
 3. TRANSMISSÕES MARGINAIS	 15
3.1. INTRODUÇÃO	15
3.2. AVALIAÇÃO DAS TRANSMISSÕES MARGINAIS ENTRE COMPARTIMENTOS SEGUNDO A NORMA EN 12354-1	16
3.3. MÉTODO TEÓRICO DE CÁLCULO DO ÍNDICE DE REDUÇÃO DE VIBRAÇÕES	18
3.4. MÉTODO EXPERIMENTAL DE CÁLCULO DO ÍNDICE DE REDUÇÃO DE VIBRAÇÕES	20
3.4.1. TEMPO DE REVERBERAÇÃO ESTRUTURAL	20
3.4.2. ÍNDICE DE REDUÇÃO DE VIBRAÇÕES	21
 4. DESCRIÇÃO GERAL DO EDIFÍCIO TIPO OBJETO DE ESTUDO	 25
4.1. EDIFÍCIOS DE VALOR PATRIMONIAL	25

4.2. ELEMENTOS DE ESTUDO	28
4.2.1. PAVIMENTOS	28
4.2.1.1. ESTRUTURA	28
4.2.1.2. REVESTIMENTO SUPERIOR	29
4.2.1.3. REVESTIMENTO INFERIOR	29
4.2.2. PAREDES.....	29

5. ENSAIOS IN SITU: ISOLAMENTO SONORO A SONS AÉREOS.....31

5.1. CASO DE ESTUDO	31
5.2. ENSAIO DE ISOLAMENTO SONORO A SONS AÉREOS DO PAVIMENTO DE MADEIRA	34
5.2.1. EQUIPAMENTO.....	34
5.2.2. MEDIÇÃO DO RUÍDO DE FUNDO	35
5.2.3. MEDIÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO	35
5.2.4. CÁLCULO DO ISOLAMENTO SONORO A SONS AÉREOS	35
5.2.5. CORREÇÃO DEVIDO AO RUÍDO DE FUNDO	36
5.2.6. TEMPO DE REVERBERAÇÃO.....	37
5.2.7. ISOLAMENTO SONORO BRUTO.....	37
5.2.8. ISOLAMENTO SONORO PADRONIZADO	38
5.2.9. ISOLAMENTO SONORO PADRONIZADO MÉDIO	38
5.2.10. ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO PADRONIZADO PONDERADO	38

6. ENSAIOS IN SITU: CARACTERIZAÇÃO DAS TRANSMISSÕES MARGINAIS.....41

6.1. EQUIPAMENTO E SOFTWARE	41
6.1.1. EXCITAÇÃO TRANSIENTE	41
6.1.2. ACELERÓMETRO	41
6.1.3. ANALISADOR	42
6.1.4. SOFTWARE	43
6.2. TEMPO DE REVERBERAÇÃO ESTRUTURAL	43
6.2.1. PROCEDIMENTO E CONSIDERAÇÕES	43
6.2.2. CÁLCULO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO ESTRUTURAL	43
6.3. TRANSMISSÕES MARGINAIS	47

6.3.1. CONSIDERAÇÕES	47
6.3.2. LOCALIZAÇÃO DOS ENSAIOS E DESCRIÇÃO DOS CAMINHOS DE PROPAGAÇÃO	47
6.3.3. OBTENÇÃO DE DADOS	50
6.3.4. TRANSFORMAÇÃO DE DADOS	51
6.3.4.1. CÁLCULO DAS VELOCIDADES A PARTIR DAS ACELERAÇÕES	51
6.3.4.2. AGLOMERAÇÃO NAS FREQUÊNCIAS CENTRAIS DE UM TERÇO DE OITAVA.....	51
6.3.5. INTEGRAL DA VELOCIDADE	52
6.3.6. DIFERENÇA DO NÍVEL DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO MÉDIO	52
6.3.7. NÍVEL DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO MÉDIO	52
6.3.8. SENTIDO MÉDIO DA DIFERENÇA DO NÍVEL DE VELOCIDADE	52
6.3.9. COMPRIMENTO DE ABSORÇÃO SONORA EQUIVALENTE	53
6.3.10. ÍNDICE DE REDUÇÃO DE VIBRAÇÕES	53
6.3.11. SÍNTESE DE RESULTADOS	53
 7. ANÁLISE DE RESULTADOS	 55
7.1. INTRODUÇÃO	55
7.2. DETERMINAÇÃO DOS VALORES TEÓRICOS DO ÍNDICE DE REDUÇÃO DE VIBRAÇÕES	55
7.3. DISCUSSÃO DOS VALORES OBTIDOS PARA OS KIJ	57
7.3.1. COMPARAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS AO LONGO DOS CAMINHOS 13 E 23.....	57
7.3.2. ANÁLISE DOS VALORES OBTIDOS PARA O CAMINHO 13.....	58
7.3.3. COMPARAÇÃO DOS ÍNDICES DE REDUÇÃO OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE, COM OS VALORES TEÓRICOS.....	59
7.4. COMPARAÇÃO DOS VALORES DO $D_{NT,w}$	60
7.5. VALIDAÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO ESTRUTUR	61
 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	 63
8.1. SÍNTESE GERAL	63
8.2. PROBLEMAS.....	64
8.3. RECOMENDAÇÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 – Organograma de objetivos da tese	2
Fig.2 – Esquema do choque de uma onda sonora com um elemento construtivo	5
Fig.3 – Reflexão especular (esquerda) e difusão (direita)	7
Fig.4 – Esquema representativo da transmissão sonora de sons aéreos (esq.) e de sons de percussão (dir.).....	9
Fig.5 – Diferença entre transmissão direta e marginal	10
Fig.6 – Cronologia bibliográfica de publicações	13
Fig.7 – Esquema exemplificativo da influência da transmissão marginal em elementos homogéneos	15
Fig.8 – Diferentes caminhos de transmissão sonora entre dois compartimentos.....	17
Fig.9 – Ligações tipo T e X.....	19
Fig.10 – Esquema de ligação tipo T	19
Fig.11 – Esquema de ligação tipo X	20
Fig.12 – Esquema de ensaio para caracterização do caminho de propagação ao longo da parede do piso 2 para a parede do piso 1	21
Fig.13 – Esquema de ensaio para caracterização do caminho de propagação parede piso 2/pavimento	22
Fig. 14 – Esquema de ensaio para caracterização do caminho de propagação parede piso 2/pavimento	22
Fig. 15 – Distâncias mínimas	23
Fig. 16 – Ilustração da construção tradicional do Porto.....	25
Fig. 17 – Parede de meação impermeabilizada com asfalto e revestida com reboco	26
Fig. 18 – Pavimento de madeira composto por troncos rolado.....	27
Fig. 19 – Estrutura das coberturas tradicionais	27
Fig. 20 – Porta encimada por bandeira.....	28
Fig. 21 – Esquema do tarugamento.....	29
Fig. 22 – Esquema das camadas do revestimento superior de pavimentos de madeira	29
Fig. 23 – Esquema das camadas do revestimento inferior de pavimentos de madeira	30
Fig. 24 – Edifício da Rua de Santo Ildefonso	31
Fig. 25 – Decoração do revestimento inferior do pavimento.....	32
Fig. 26 – Claraboia sob a caixa de escadas	32
Fig. 27 – Compartimentos recetor (esq.) e emissor (dir.)	33
Fig. 28 – Abertura de separação entre os quartos	33
Fig. 29 – Altifalante	34

Fig. 30 – Sonómetro.....	35
Fig. 31 – Martelo usado nos ensaios	41
Fig. 32 – Acelerómetro.....	42
Fig. 33 – Aceleração em função do tempo.....	44
Fig. 34 – Nível de aceleração em função do tempo	45
Fig. 35 – Evolução do nível de aceleração em função do tempo, no intervalo indicado pela norma ISO 3382	46
Fig. 36 – Reta de decaimento	46
Fig. 37 – Localização dos ensaios.....	48
Fig. 38 – Pormenor construtivo da ligação entre a parede de meação e o pavimento	49
Fig. 39 – Pormenor construtivo da ligação entre a parede de tabique e o pavimento	49
Fig. 40 – Marcação dos pontos de colocação do acelerómetro e dos pontos de excitação.....	50
Fig. 41 – Fixação do acelerómetro com cera de abelha.....	50
Fig. 42 – Comparação entre as velocidades nos caminhos 12 e 23	57
Fig. 43 – Comparação da diferença média do nível de velocidade.....	58
Fig. 44 – Diferença média do nível de velocidade no caminho 13.....	59
Fig. 45 – Comparação entre os vários valores de $D_{nT,w}$	60

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Quadro de referências	14
Quadro 2 – Especificações do equipamento para ensaio de isolamento aéreo	35
Quadro 3 – Nível médio de pressão sonora (dB) no compartimento recetor para uma dada posição do altifalante	36
Quadro 4 – Correção devido ao ruído de fundo	36
Quadro 5 – Tempo de reverberação do compartimento recetor	37
Quadro 6 – Isolamento sonoro bruto (dB) para uma dada posição do altifalante	37
Quadro 7 – Isolamento sonoro padronizado (dB) para uma posição do altifalante	38
Quadro 8 – Isolamento sonoro padronizado médio (dB)	38
Quadro 9 – Curva de referência referente a sons aéreos (EN ISO 717-1)	38
Quadro 10 – Última iteração do processo de obtenção do $D_{nT,w}$	39
Quadro 11 – Características do acelerómetro	42
Quadro 12 – Características do analisador	42
Quadro 13 – Configuração do SignalCalc Ace	43
Quadro 14 – Descrição dos caminhos de propagação na parede de meiação	48
Quadro 15 – Descrição dos caminhos de propagação na parede de tabique	49
Quadro 16 – Limites superior e inferior de cada banda de um terço de oitava	51
Quadro 17 – Diferença média do nível de velocidade de vibração (k_{13})	52
Quadro 18 – Nível de velocidade de vibração médio (k_{13})	52
Quadro 19 – Sentido médio da diferença do nível de velocidade (k_{23})	52
Quadro 20 – Comprimentos de absorção equivalente (k_{23})	53
Quadro 21 – Espectro do índice de redução de vibrações (k_{23})	53
Quadro 22 – k_{ij} da parede de meiação	53
Quadro 23 – k_{ij} da parede de meiação considerando valores negativos como zero	54
Quadro 24 – Índice de redução sonora ponderado	54
Quadro 25 – Massas superficiais e redução sonora	55
Quadro 26 – k_{ij} teórico para parede de meiação	56
Quadro 27 – k_{ij} teórico para a parede de fachada	56
Quadro 28 – k_{ij} teórico para a parede de tabique	56
Quadro 29 – Redução sonora da parede de meiação	56
Quadro 30 – k_{ij} teórico vs k_{ij} experimental da parede de meiação	59
Quadro 31 – Fator de perdas teórico	61

Quadro 32 – Tempo de reverberação estrutural teórico	61
--	----

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

- A – área de absorção sonora equivalente (m^2)
- a_i – comprimento de absorção equivalente do elemento i (m)
- a_j – comprimento de absorção equivalente do elemento j (m)
- c – celeridade do ar (m/s)
- c_o – velocidade do som no ar (m/s)
- D – isolamento sonoro bruto (dB)
- D_d – caminho direto através do elemento de separação
- D_f – caminho com origem no elemento de separação e propagação para o elemento marginal
- D_{nT} – isolamento sonoro padronizado (dB)
- $D_{nT,w}$ – isolamento sonoro padronizado ponderado (dB)
- $\overline{D_{v,ij}}$ – sentido médio da diferença do nível de velocidade
- $D_{v,ij}$ – nível de velocidade médio de vibração no caminho de i para j (dB)
- $D_{v,ji}$ – nível de velocidade médio de vibração no caminho de j para i (dB)
- $D_{v,ij,mn}$ – diferença do nível de velocidade entre os pontos do elemento i e j para cada excitação
- f – frequência (Hz)
- F_d – caminho com origem no elemento marginal e propagação para o elemento de separação
- f_{ref} – frequência de referência (Hz)
- $I_{incidente}$ – energia sonora incidente
- $I_{transmitida}$ – energia sonora transmitida
- k_{ij} – índice de redução de vibrações
- l_o – comprimento de referência
- L_1 – nível de pressão sonora no compartimento emissor (dB)
- L_2 – nível de pressão sonora no compartimento recetor (dB)
- l_f – comprimento comum entre o elemento de separação e o elemento marginal (m)
- l_{ij} – comprimento comum da ligação entre os elementos i e j (m)
- L_{nT} – nível de pressão sonora de percussão padronizado (dB)
- M – relação logarítmica entre a massa superficial de dois elementos
- M – número de pontos de excitação
- m_1 – massa superficial do elemento 1 (m^2)
- m_2 – massa superficial do elemento 2 (m^2)
- m_3 – massa superficial do elemento 3 (m^2)

N – número de pontos de medição

R – redução sonora (dB)

$R_{Dd,w}$ – índice de redução sonora ao longo do caminho direto (dB)

$R_{Df,w}$ – índice de redução sonora ao longo do caminho com origem no elemento de separação e propagação para o elemento marginal (dB)

$R_{Fd,w}$ – índice de redução sonora ao longo do caminho com origem no elemento marginal e propagação para o elemento de separação (dB)

$R_{i,w}$ – índice de redução sonora ponderado para o elemento i (dB)

$R_{j,w}$ – índice de redução sonora ponderado para o elemento j (dB)

$R_{S,w}$ – índice de redução sonora ponderado para o elemento de separação (dB)

R_w – redução sonora ponderada (dB)

R'_w – redução sonora ponderada com efeito das transmissões marginais (dB)

R' – redução sonora aparente (dB)

S – superfície do elemento de separação (m^2)

S_i – área superficial do elemento (m^2)

S_j – área superficial do elemento j (m^2)

S_s – superfície do elemento de separação (m^2)

T – tempo de reverberação (s)

T_0 – tempo de reverberação de referência (s)

T_{30} – tempo de reverberação medido para um decaimento de 30 dB (s)

T_{60} – tempo de reverberação medido para um decaimento de 60 dB (s)

T_m – tempo de integração (s)

T_s – tempo de reverberação estrutural (s)

T_{si} – tempo de reverberação estrutural do elemento i (s)

T_{sj} – tempo de reverberação estrutural do elemento j (s)

V – volume do compartimento (m^3)

v_i – velocidade normal no elemento i (m/s)

v_j – velocidade normal no elemento j (m/s)

W_d – transmissão sonora por via direta [W]

W_i – transmissão sonora por via indireta (ou marginal) [W]

α – coeficiente de absorção sonora

$\Delta R_{ij,w}$ – acréscimo de isolamento sonoro no caminho ij

μ – coeficiente de temperatura

τ – coeficiente de transmissão

FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E MOTIVAÇÃO

A acústica tem vindo a ganhar importância com o desenvolvimento industrial, tecnológico e económico uma vez que as fontes sonoras se foram multiplicando com o aumento e evolução populacional, até ao ponto em que hoje em dia o conforto acústico é um requisito de qualquer cidadão tanto ao nível da habitação como do trabalho.

Para se ter uma ideia, segundo a agência Lusa em 2016, “12 % da população residente em Portugal continental está exposta a níveis sonoros que induzem perturbações no sono” e 17 % está sujeita a níveis de incomodidade moderada. Ainda na mesma notícia é referido que “o ruído elevado tem vários efeitos na saúde, como hipertensão e doenças cardiovasculares, levando a cerca de 10 mil mortes prematuras e a 43 mil hospitalizações por ano, na Europa [1].

Para além de ataques cardíacos, o ruído ou som, dependendo se tem ou não significado para quem o recebe, tem também influência no sistema digestivo e no sistema neurológico o que provoca não só desconforto no interior da habitação e no local de trabalho como já referido, como ao nível da comunicação. Torna-se portanto indispensável atuar na redução deste tipo de problemas.

A acústica subdivide-se em diversas áreas como a bioacústica, psicoacústica, arquitetónica, musical, subaquática, eletroacústica e acústica de edifícios, sendo a última o âmbito deste trabalho.

A acústica de edifícios teve origem no início do século XX com o físico americano Wallace Sabine que formulou uma relação entre o tempo de reverberação, a absorção sonora e o volume de um compartimento. Os dois primeiros conceitos serão explicados no Capítulo 2 mas importa referir que o tempo de reverberação tem um papel importante na perceção da palavra.

O som/ruído propaga-se no ar sobre a forma de ondas esféricas concêntricas cujo centro é a fonte sonora.

Entende-se por fonte sonora toda e qualquer ação que provoque uma variação de pressão no meio de propagação das ondas sonoras, geralmente o ar, mas como veremos de seguida há outros meios de propagação e que são de extrema importância neste trabalho.

Ao som que se propaga pelo ar dá-se o nome de ruídos de condução aérea. Existem ainda o caso de ruídos originados por solicitação mecânica dos elementos construtivos, denominados de ruídos de percussão. Estes subdividem-se ainda em ruídos de fontes estáticas como por exemplo sistemas de bombagem e ar condicionados, e em fontes de impacto, sendo os mais comuns o bater de portas, passos e ruído de obras. Ambos podem ser transmitidos por via direta em que o som atravessa diretamente um elemento construtivo (parede ou laje) de um compartimento para o outro, ou por via indireta ou marginal, e salienta-se a palavra marginal, em que o som é conduzido através dos elementos construtivos e se

transforma em ruído de condução aérea nos compartimentos vizinhos. E novamente se salienta a palavra “vizinhos” no plural pois os ruídos de percussão têm uma maior capacidade de propagação ao longo do edifício.

No parágrafo anterior salienta-se a palavra marginal porque é precisamente sobre esse tipo de transmissão que este trabalho incide, mais especificamente transmissões marginais em soluções construtivas antigas.

1.2. OBJETIVO E ÂMBITO

Esta dissertação surge como o trabalho final de conclusão de curso em Engenharia civil na área de construções civis. A escolha pelo tema deve-se ao interesse suscitado pela área na cadeira de Acústica de Edifícios, cadeira opcional no 5º ano do ramo de construções civis.

O âmbito deste trabalho são as soluções construtivas em edifícios antigos do Porto burguês, que serão representadas por um caso de estudo. Note-se que neste tipo de edifícios existem vários tipos de soluções construtivas semelhantes, esta dissertação foca-se apenas nas situações encontradas no caso de estudo apresentado.

Pretende-se com este trabalho, avaliar, por experimentação, o cálculo dos valores usados para transmissões marginais no isolamento de edifícios antigos. Para isso realiza-se a comparação dos valores do isolamento sonoro obtidos através de três processos, primeiro o valor obtido por medição “*in situ*” dos níveis de pressão sonora ($D_{nT,w}$ “*in situ*”), depois o valor obtido através da caracterização, por medições “*in situ*”, das transmissões marginais ao longo dos elementos do edifício ($D_{nT,w}$ experimental), e por último, o valor obtido através do modelo teórico existente para caracterização das transmissões marginais ($D_{nT,w}$ teórico).

Na Figura 1 apresenta-se o organograma síntese da dissertação.

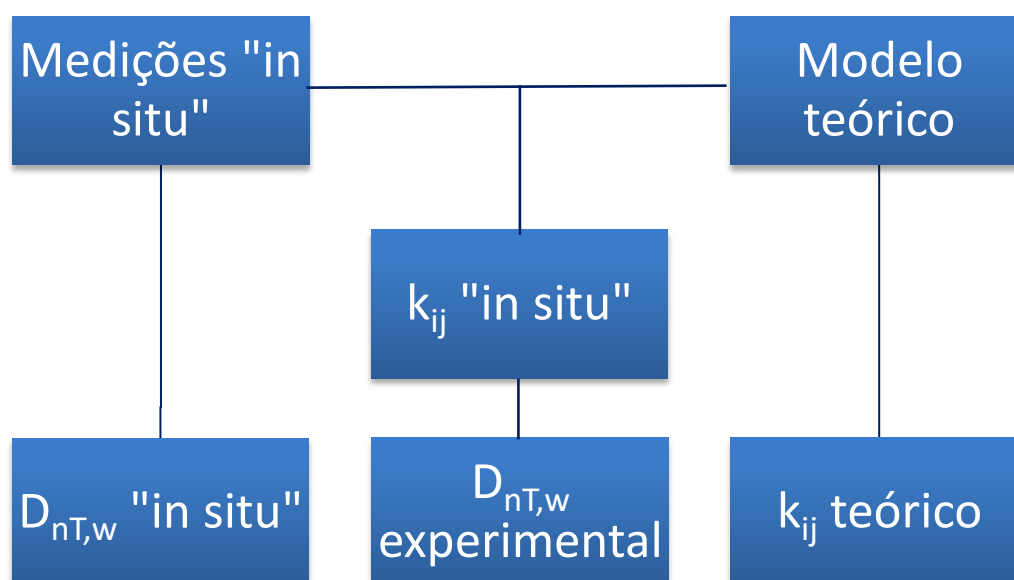


Figura 1 - Organograma de objetivos da tese

1.3. ORGANIZAÇÃO

De modo a alcançar os objetivos propostos, procedeu-se a um conjunto de passos cuja estrutura se descreve.

Neste capítulo faz-se uma breve introdução ao tema das transmissões marginais, e apresentam-se os objetivos propostos e campo de aplicação desta dissertação.

No Capítulo 2 – Estado de arte, apresentam-se os conceitos básicos que se julgaram importantes para o entendimento do trabalho, assim como se realiza uma síntese da informação encontrada sobre o mesmo tema.

No Capítulo 3 – Transmissões marginais, desenvolve-se, tal como o nome indica, o tema das transmissões marginais, apresentando os métodos de cálculo existentes e o procedimento dos ensaios “*in situ*”, para a caracterização deste parâmetro.

No Capítulo 4 – Descrição geral do edifício tipo objeto de estudo, descreve-se, de uma forma geral, o parque edificado que se pretende estudar, fazendo-se a descrição das soluções construtivas normalmente encontradas no edifício burguês do Porto.

No Capítulo 5 – Ensaios “*in situ*”: Isolamento sonoro a sons aéreos, procede-se à descrição específica do edifício estudado, e apresenta-se o procedimento de cálculo para obtenção do valor do isolamento sonoro “*in situ*”, ou seja, através da medição direta dos níveis de pressão sonora nos compartimentos.

No Capítulo 6 – Ensaios “*in situ*”: Caracterização das transmissões marginais, apresenta-se o procedimento de medição e de cálculo das transmissões marginais, e calcula-se o respetivo valor do isolamento sonoro.

No Capítulo 7 – Análise de resultados, começa-se por calcular o valor do isolamento sonoro através da caracterização das transmissões marginais, por aplicação do modelo teórico, e ainda se efetuam as análises necessárias de forma a discutir os resultados obtidos.

Por fim, no Capítulo 7 – Considerações finais, apresentam-se as conclusões retiradas pela análise dos resultados, e propõem-se ideias para desenvolvimento futuro.

2

ESTADO DE ARTE

2.1 NOÇÕES GERAIS

Admite-se no presente trabalho que o leitor se encontra minimamente familiarizado com os conceitos básicos associados à área da Acústica de Edifícios, desta forma não serão explicitados todos os conceitos base mas apenas os mais específicos ao tema abordado. Caso o leitor não possua conhecimentos na área, a fim de obter uma base de informação que torne possível uma melhor compreensão do trabalho, recomenda-se a leitura do livro *Acústica nos Edifícios* de Jorge Patrício [2] ou em alternativa os apontamentos de *Acústica Ambiental e de Edifícios* do Professor Doutor António Oliveira de Carvalho [3].

2.1.1 TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O som propaga-se através de ondas esféricas com origem na fonte, estas, ao atingirem qualquer superfície separam-se em três componentes, uma correspondente à energia que é absorvida pela superfície, outra que é refletida pela mesma, e por fim outra que a atravessa diretamente (Figura 2). Num espaço fechado pode-se então perceber que após as ondas diretas atingirem a envolvente ou os elementos que a constituem (mesas, cadeiras, e até pessoas), formam-se várias ondas refletidas com múltiplas direções que se vão tornando mais fracas pelas múltiplas absorções que sofrem em cada reflexão e também pelo efeito da absorção do ar. Portanto a existência de som não termina quando a fonte sonora é interrompida mas sim quando as ondas refletidas se dissipam totalmente.

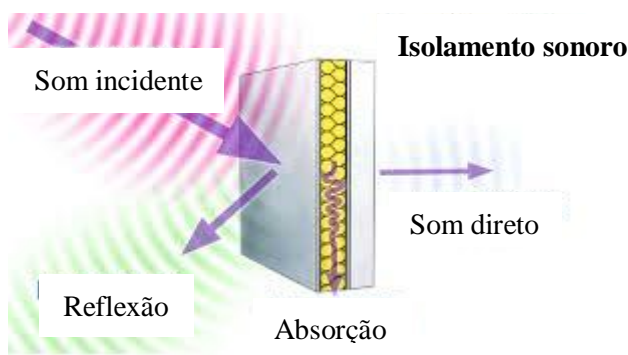


Figura 2 - Esquema do choque de uma onda sonora com um elemento construtivo (adaptado) [4]

O tempo de reverberação (T), não é mais que o intervalo de tempo, medido em segundos, entre o qual a fonte sonora começa a emitir e após as múltiplas reflexões o som se extingue. Por definição corresponde ao tempo que o nível de pressão sonora demora a descer 60 dB desde a interrupção da fonte, no entanto

como nem sempre é possível medir essa descida devido à existência de ruídos de fundo, normalmente faz-se a medição para 30 dB e extrapola-se os resultados para os 60 dB, diferenciando-se os valores através da designação T_{30} e T_{60} respetivamente.

O tempo de reverberação tem efeitos na perceção da palavra podendo-se compreender que tanto podem ser favoráveis como desfavoráveis, na medida em por um lado aumenta o nível sonoro devido à adição do som refletido ao som direto, mas por outro diminui a clareza com que é recebido devido à sobreposição dos mesmos.

O primeiro a formular uma expressão matemática para o cálculo do tempo de reverberação de um compartimento foi o físico Wallace Sabine em 1898, relacionando-o com a absorção sonora e o volume, originando a seguinte fórmula que viria a ser conhecida como a Fórmula de Sabine:

$$T = 0,16 * \frac{V}{A} \quad (1)$$

Sendo:

- T: Tempo de Reverberação (s)
- V: Volume do compartimento (m^3)
- A: Absorção sonora (m^2) (Capítulo 2.1.2)

O valor do coeficiente de 0,16 corresponde a uma temperatura de 24 °C, de forma mais rigorosa pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$\mu = \frac{24 * \ln 10}{c} \quad (2)$$

Em que c é a celeridade do som no ar em m/s.

Ao longo dos anos foram surgindo outras expressões que se adequam a situações mais particulares, no entanto optou-se por não fazer essa descrição neste trabalho.

2.1.2 ABSORÇÃO SONORA

A absorção sonora corresponde à capacidade de dissipação de energia dos materiais quando neles incide uma onda sonora, e geralmente resulta na transformação dessa energia em energia térmica.

À relação entre a energia absorvida por um material, e a energia que sobre ele incide, dá-se o nome de coeficiente de absorção sonora (α), este valor depende do ângulo de incidência e da frequência do som incidente.

O valor do parâmetro α pode ser calculado de duas formas, através do método do tubo de ondas estacionárias e o método da câmara reverberante, sendo o segundo mais adequado a situações reais uma vez que, ao contrário do primeiro, as ondas sonoras incidem na amostra de todos os ângulos (campo difuso) e não apenas perpendicularmente.

De forma simplificada, o parâmetro A do subcapítulo anterior pode ser obtido através da seguinte relação:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i * S_i \quad (3)$$

Onde:

- α_i : coeficiente de absorção sonora do material i
- S_i : superfície real do material (m^2)

2.1.3 DIFUSÃO

A difusão corresponde à capacidade de um material refletir uma onda sonora que lhe incide, direta ou indiretamente, não apenas em uma direção (reflexão especular) mas em várias. Na Figura 3 ilustra-se a diferença entre os dois conceitos.

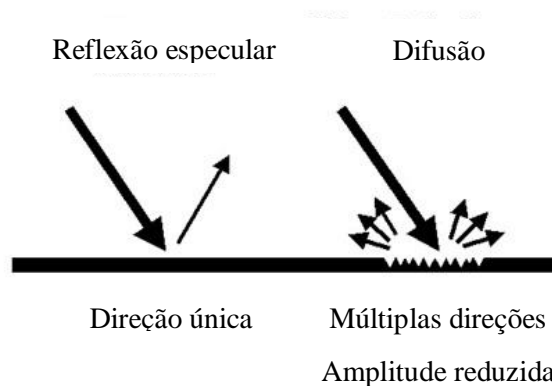


Figura 3 - Reflexão especular (esquerda) e difusão (direita) (adaptado) [5]

Esta característica é especialmente importante nas câmaras reverberantes uma vez que é necessário que o material ensaiado seja atingido de todos os ângulos para melhor o caracterizar face a uma situação real.

2.1.4 SONS AÉREOS

Os sons aéreos correspondem a uma propagação exclusivamente derivada da vibração do ar com origem em uma fonte sonora e podem ter origem tanto no interior como exterior.

Relativamente ao exterior, podem ser originados através do tráfego rodoviário, ferroviário ou aéreo, enquanto interiormente podem ter origem no funcionamento de equipamentos, na conversação ou na atividade quotidiana. A análise do comportamento de um elemento construtivo isolado, é realizada pelo que se designa de redução sonora, R.

$$R = 10 * \log \frac{1}{\tau} \quad (4)$$

Onde τ é o coeficiente de transmissão e corresponde à razão entre a energia sonora transmitida e a energia incidente.

$$\tau = \frac{I_{\text{transmitida}}}{I_{\text{incidente}}} \quad (5)$$

No entanto, na realidade não se pode caracterizar o isolamento de um espaço apenas através das características do elemento separador, é necessário considerar o efeito da absorção sonora e das dimensões do compartimento recetor. O parâmetro que designa o isolamento sonoro tendo em conta todas as ações anteriores designa-se por isolamento sonoro bruto, D .

$$D = L_1 - L_2 \quad (6)$$

Onde:

- L_1 : nível médio da pressão sonora no compartimento emissor (dB)
- L_2 : nível médio da pressão sonora no compartimento recetor (dB)

Ambos os conceitos podem ser relacionados através da expressão 7, sendo que em medições “*in situ*”, dada a presença de transmissões marginais, a diferença entre os valores da redução sonora é realizada com recurso a um novo parâmetro designado de redução sonora aparente, R' .

$$D = R + 10 \log \frac{A}{S} \quad (7)$$

ou

$$D' = R' + 10 \log \frac{A}{S} \quad (8)$$

Respetivamente:

- D : isolamento sonoro bruto (dB)
- R : redução sonora (medida em laboratório) (dB)
- R' : redução sonora aparente (medida “*in situ*”) (dB)
- A : área de absorção sonora equivalente no compartimento recetor (m^2)
- S : superfície do elemento de separação (m^2)

Na prática, uma vez que são realizados vários ensaios em locais ainda não mobilados, e a fim de prevenir a hipótese de criação de condições de absorção superiores às futuramente existentes, recorre-se habitualmente ao isolamento sonoro padronizado, D_{nT} .

$$D_{nT} = D + 10 \log \frac{T}{T_0} \quad (9)$$

Onde:

- D_{nT} : isolamento sonoro padronizado (dB)
- T : tempo de reverberação do compartimento recetor (s)
- T_0 : tempo de reverberação de referência (em geral 0,5 s)

2.1.5 SONS DE PERCUSSÃO

Os sons de percussão resultam de um contacto direto sobre um elemento construtivo, estando a sua capacidade de propagação ligada à rigidez das ligações entre os mesmos. Por esta razão têm um alcance significativamente superior do que os sons aéreos (Figura 4).

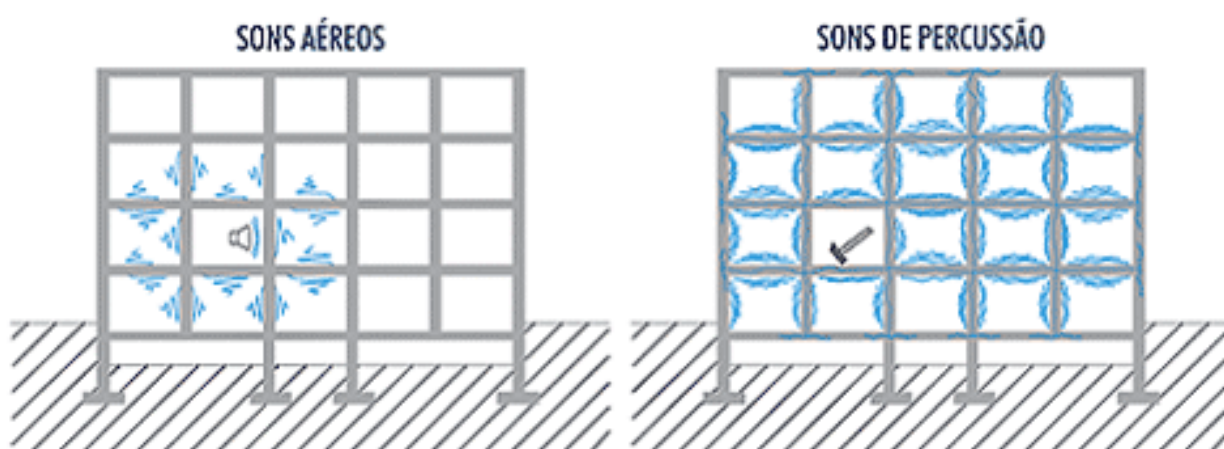


Figura 4 - Esquema representativo da transmissão sonora de sons aéreos (esq.) e de sons de percussão (dir.) [6]

As considerações apresentadas no capítulo anterior aplicam-se também aos sons de percussão, com a diferença de que nos últimos a medição do nível de pressão sonora no compartimento emissor não é relevante uma vez que a relação com os valores do nível de pressão sonora no compartimento recetor é pequena.

$$L_{nT} = L_2 + 10 \log \frac{T}{T_0} \quad (10)$$

Onde:

- L_{nT} : nível de pressão sonora de percussão padronizado (dB)

Os métodos de caracterização dos sons de percussão serão abordados no capítulo 3.

2.1.6 TRANSMISSÕES MARGINAIS

Tanto os sons aéreos como os de percussão se dividem em duas componentes, uma componente que atravessa diretamente o elemento construtivo entre dois compartimentos e outra que atravessa o mesmo indiretamente através do pavimento, teto ou paredes laterais (Figura 4). A última componente designa-se normalmente por transmissões marginais.

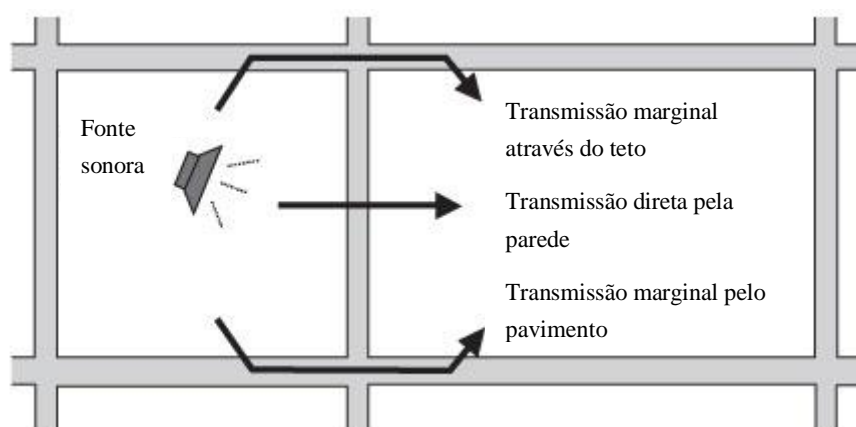


Figura 5 - Diferença entre transmissão direta e marginal (adaptado) [7]

O parâmetro que quantifica transmissões marginais designa-se índice de redução de vibrações k_{ij} . Dada a sua importância neste trabalho, o método de cálculo será abordado no capítulo 3.

2.2 SÍNTESE DO CONHECIMENTO

O objetivo deste subcapítulo passa por consciencializar o leitor para as abordagens já realizadas sobre o tema ao nível de teses, artigos e revistas científicas. Para isso realiza-se uma síntese daquilo que foi encontrado através dos repositórios de faculdades e por pesquisa em bases bibliográficas como Inspec, Scopus e Web of Science.

As transmissões marginais são um fenómeno que se traduz numa redução do desempenho do isolamento entre dois espaços compreendendo-se portanto a importância da sua previsão em fase de projeto.

Quando se trata de transmissões marginais, um dos maiores contribuidores para o desenvolvimento do tema é Eddy Gerretsen (1979) [8] professor na Universidade de Eindhoven. O seu contributo iniciou-se nos finais da década de 70 com o desenvolvimento de um modelo prático para o cálculo das transmissões marginais com origem em sons aéreos, incorporando apenas os efeitos de primeira ordem, ou seja, apenas considerando a ação dos elementos ligados diretamente ao elemento de separação entre os espaços. O método tem por base o índice de redução sonora de transmissões diretas de diferentes estruturas, e as diferenças de vibração entre as ligações dos elementos construtivos. Através da sua aplicação, Gerretsen concluiu que o seu modelo é equiparável ao modelo SEA, com uma margem de erro de 1.5 dB.

Nos finais dos anos 80, Gerretsen (1986) [9] alargou o campo de aplicação do modelo preconizado aos sons de percussão. Estes dois documentos serviram como pilar ao desenvolvimento dos métodos de previsão atualmente utilizados, as Normas 12354-1 [10] e 12354-2 [11], respetivamente para sons aéreos e sons de percussão.

Contudo, os métodos desenvolvidos por Gerretsen focam-se em elementos homogéneos e pesados, não sendo portanto aplicáveis a todas as situações. Partindo deste pressuposto, Jeffrey Mahn (2009) [12] analisou a sua aplicabilidade a elementos leves, notando que a variação do campo vibratório nos elementos leves pode levar a uma incerteza significativa. Do mesmo modo, Jaime Ramis et al. (2012)

[13] concluem que se tratam de elementos com um campo de vibrações complexo e que dependem fortemente da frequência.

No mesmo ano, Stefan Shoenwald (2012) [14], compara três métodos de determinação das transmissões marginais em elementos leves, propostos no COST FP0702 – European Cooperation of Science and Technology. Um apoiado na abordagem proposta pelo CSTB – Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, baseado nos trabalhos de Catherine Guigou-Carter et al. (2006) [15] e Michel Villot et al. (2006) [16], outro baseado na sua própria tese de doutoramento (2008) [17], e por fim a perspetiva de Gerretsen (2005) [18]. Os resultados obtidos entre os métodos mostraram-se compatíveis.

O próprio Gerretsen apresenta numa conferência, em 2015 [19], uma reflexão sobre as medidas a tomar para adequar os seus métodos a elementos leves. No entanto refere que a ausência de dados para os sistemas leves, à data da apresentação, não permitia ainda retirar conclusões finais.

Ao longo dos anos, foram surgindo diversos estudos e análises com base na primeira abordagem de Gerretsen, para os mais diversos elementos e soluções construtivas. Entre eles está a análise de Heirich Metzen (1999) [20] aos resultados obtidos em elementos pesados através dos modelos, simplificado e detalhado da Norma 12354. Metzen testou os dois modelos e obteve variações à volta de 2 dB para ambos, e também utilizando o modelo detalhado com a correção para o tempo de reverberação estrutural.

As diferenças encontradas por Metzen podem estar relacionadas com os trabalhos de Robert Craik (2001) [21] e Laurent Galbrun (2008) [22] que discutiram a influência da consideração de apenas os efeitos de primeira ordem, concluindo de igual forma que a restrição do cálculo aos efeitos de primeira ordem pode conduzir a erros na ordem dos 5 a 10 dB.

Trevor Nightingale e Ivan Bosmans (1999) [23], estudaram o comportamento de várias paredes e pavimentos com estruturas em madeira, concluindo que existe um ponto de localização de energia perto do ponto de excitação e que estas soluções se comportam de forma isotrópica, ou seja, na direção normal aos elementos da estrutura existe uma atenuação muito elevada enquanto longitudinalmente o mesmo não se verifica.

M. Schneider e H-M. Fischer (2001) [24] analisaram o comportamento de paredes de alvenaria em laboratório, para isso começaram por analisar o nível de velocidade em pontos igualmente espaçados ao longo de uma linha. Os resultados mostraram que em frequências baixas existe uma grande variação do nível de velocidade, em níveis médios os resultados foram quase constantes e nas frequências altas o nível de velocidade decresce substancialmente quanto maior for a distância à fonte. Através da montagem de paredes iguais noutros laboratórios, mas com ligações aos elementos do laboratório diferentes, obtiveram diferenças de aproximadamente 5 dB, nas frequências médias, ao longo do caminho entre elementos marginais.

Carl Hopkins (2004) [25] efetuou a comparação entre uma laje de betão e um pavimento composto por vigotas e blocos de betão, comentando que pavimento composto apresentou um comportamento ortotrópico, ou seja, o seu comportamento depende da direção axial ou radial de transmissão de vibrações. Através dos resultados obtidos também concluiu que este tipo de pavimento exibe um comportamento pior quanto ao isolamento de sons aéreos, uma vez que em frequências inferiores a 500 Hz a transmissão marginal ao longo do caminho de uma parede de alvenaria para o pavimento apresenta valores significativamente superiores aos obtidos num pavimento homogéneo.

Martína et al. (2006) [26] analisaram o efeito das transmissões marginais através da sua medição antes e depois da abertura de fendas nas paredes do compartimento recetor de forma a evitar a transmissão sonora ao longo dessas paredes. Para além disso, obtiveram resultados semelhantes quando compararam as transmissões marginais antes da abertura da parede, com as obtidas com as fendas preenchidas por

silicone, ou seja, a redução das vibrações ao longo da parede com as aberturas, devia-se à diferença de meio de propagação.

Claire Churchill e Carl Hopkins (2016) [27] estudaram a previsão do isolamento de sons aéreos num pavimento de madeira e betão através de modelos que usem o método SEA, referindo que os modelos foram capazes de prever o índice de redução sonora com uma imprecisão de 2dB.

Jordi Poblet-Puig (2016) [28] formulou um modelo de previsão das transmissões diretas e marginais alegando que o método de elementos finitos (FEM – Finit Element Method), o método de elemento limite (BEM – Boundary Element Method) e outras técnicas determinísticas baseadas na discretização do espaço não são normalmente viáveis em termos de consumo de tempo e são computacionalmente mais complexas, uma vez que em acústica de edifícios normalmente o interesse é descrever o comportamento de um único elemento e para o cálculo das transmissões marginais é necessário ter em conta o edifício como um todo. O modelo formulado foi implementado em software e é válido para uma grande variedade de ligações estruturais e estruturas. A principal característica requerida pelo método é o índice de redução sonora.

A nível de autores nacionais salientam-se o trabalho de Juliana António e Diogo Mateus da Universidade de Coimbra [29] que realizaram em 2015 medições “*in situ*” dos edifícios tradicionais portugueses com vista a determinar a influência das bandas de baixa frequência na determinação dos parâmetros de isolamento sonoro, e na Universidade do Porto, o trabalho de Dóris Queirós, Rui Calejo Rodrigues e Nelson Pereira [30] que estudaram o comportamento de treze pavimentos de madeira semelhantes e os compararam com o desempenho de um pavimento construído em laboratório. Neste estudo referem ainda que apesar dos modelos atuais poderem caracterizar fielmente algumas soluções construtivas, quando utilizados fora do âmbito de elementos de betão não refletem o seu comportamento real pelo facto de não terem em conta as transmissões marginais, que são de maior importância nestas soluções. Ambos foram publicados internacionalmente

Para finalizar, Jorge Patrício refere no seu livro Acústica de Edifícios [2], que apesar da aplicabilidade dos modelos atuais não ser fidedigna, nas soluções típicas portuguesas a quantificação das transmissões marginais deixa de ser relevante uma vez que a propagação da energia sonora ocorre quase totalmente através do próprio pavimento, logo o resultado do isolamento sonoro corresponde na sua maioria a este tipo de transmissão.

Com base nos artigos supracitados procedeu-se à elaboração do cronograma da Figura 6. Salienta-se que não é pretendido que o cronograma demonstre uma evolução precisa da informação sobre este tema, uma vez que não se exclui a existência de outros estudos. Pretende-se apenas dar ao leitor uma aproximação da sua evolução.

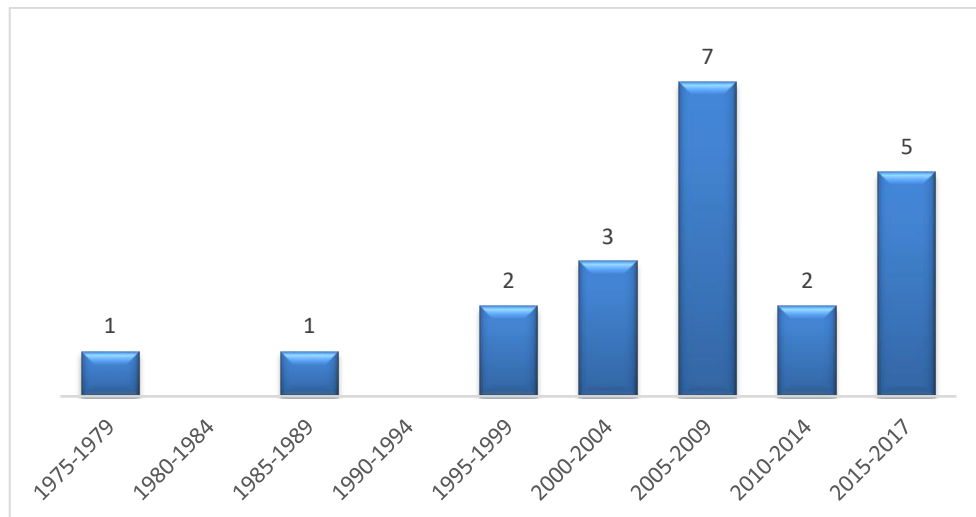


Figura 6 - Cronologia bibliográfica de publicações

Em relação a teses e dissertações, salienta-se a dissertação de João Martins [31] da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto cujo objetivo foi estudar uma ligação corrente na construção portuguesa, neste caso uma ligação em T, e analogamente a este trabalho correlacionar os valores do parâmetro k_{ij} obtidos “*in situ*”, com os valores obtidos através da norma EN 12354-1 [10]. A partir dos resultados obtidos, foi concluído que a heterogeneidade dos elementos construtivos tem influência nos resultados e que a aplicabilidade dos métodos de cálculo teóricos do parâmetro k_{ij} é questionável quando aplicada à construção portuguesa.

Mais recentemente, Rogério Silva [32] em 2015 e Artur Sousa [33] em 2016 concluíram de igual forma, que os modelos existentes não se adequam ao estudo de pavimentos de madeira.

Quadro 1 - Quadro de referências

1979	
1986	<ul style="list-style-type: none"> • Gerretsen - <i>Calculation of airborne and impact sound insulation between dwellings</i> (Applied Acoustics)
1999	<ul style="list-style-type: none"> • Metzen Heinrich - <i>Accuracy of CEN-prediction models applied to German building situations</i> (Building Acoustics) • Nightingale e Bosmans - <i>Vibration response of lightweight wood frame building elements</i> (Building Acoustics)
2001	<ul style="list-style-type: none"> • Craik - <i>The contribution of long flanking paths to sound transmission in buildings</i> (Applied Acoustics)
2004	<ul style="list-style-type: none"> • Hopkins - <i>Airborne sound insulation of beam and block floors: direct and flanking transmission</i> (Applied Acoustics) • Martina, M.A. [et al.] - <i>Sound Flanking Transmission: Assessment by a Slit Method</i> (Building Acoustics) • Gerretsen - <i>Calculation of the sound transmission between dwellings by partitions and flanking structures</i> (Applied Acoustics)
2005	<ul style="list-style-type: none"> • Gerretsen - <i>Development and use of prediction models in building acoustics as in EN 12354</i> (Proceedings of Forum Acusticum) • Schneider e Fischer - <i>Flanking transmission of masonry building elements with flexible interlayer</i> (Forum Acusticum)
2006	<ul style="list-style-type: none"> • Guigou-Carter, Villot e Wetta - <i>Prediction method adapted to wood frame lightweight constructions</i> (Building Acoustics) • Villot e Guigou-Carter - <i>Measurement methods adapted to wood frame lightweight constructions</i> (Building Acoustics)
2008	<ul style="list-style-type: none"> • Schoenwald - <i>Flanking sound transmission through lightweight framed double leaf walls : prediction using statistical energy analysis</i> (Tese de Doutoramento na Universidade Técnica de Eindhoven) • Galbrun Laurent - <i>The prediction of airborne sound transmission between two rooms using first-order flanking paths</i> (Applied Acoustics)
2009	<ul style="list-style-type: none"> • Mahn - <i>Prediction of flanking noise transmission in lightweight building constructions: A theoretical and experimental evaluation of the applica-tion of EN12354-1</i> (Tese de Doutoramento na Universidade de Canterbury)
2012	<ul style="list-style-type: none"> • Ramis [et al] - <i>Numerical evaluation of the vibration reduction index for structural joints</i> (Archives of Acoustics) • Shoenwald - <i>Comparison of proposed methods to include lightweight framed structures in EN 12354 prediction model</i> (Euronoise)
2015	<ul style="list-style-type: none"> • Gerretsen - <i>Extending EN 12354 sound insulation modelling to composed, lightweight building systems</i> (Proceedings of Inter Noise) • António e Mateus - <i>Influence of low frequency bands on airborne and impact sound insulation single numbers for typical Portuguese buildings</i> (Applied Acoustics)
2016	<ul style="list-style-type: none"> • Churchill e Hopkins - <i>Prediction of airborne sound transmission across a timber-concrete composite floor using Statistical Energy Analysis</i> (Applied Acoustics) • Poblet-Puig - <i>A modal-spectral model for flanking transmissions</i> (Journal of Sound and Vibration) • Queirós, Calejo Rodrigues e Pereira- <i>Historical building acoustical retrofit: An experimental examination of traditional wooden floors</i> (Building Acoustics)

3

TRANSMISSÕES MARGINAIS

3.1 INTRODUÇÃO

A quantificação das transmissões marginais no que diz respeito a sons aéreos consistia, até recentemente, em dois métodos de quantificação. O primeiro consiste na relação entre as características do isolamento sonoro do elemento de separação e dos elementos vizinhos, sendo-lhes atribuídas classes de contribuição da transmissão marginal e valores corretivos obtidos através de ensaios laboratoriais ou de modelos de cálculo.

As classes de contribuição eram as seguintes:

- “Para valores de índice de isolamento a sons aéreos $R_w \leq 35$ dB, a contribuição da transmissão marginal é desprezável, ficando $R_w = R_w'$ ”
- Para valores de índice de isolamento a sons aéreos que observem a condição em que $35\text{dB} < R_w < 45\text{dB}$, a contribuição da transmissão marginal traduz-se na redução do índice de isolamento sonoro de 3 dB, ou seja, $R_w' = R_w - 3$
- Para valores do índice de isolamento a sons aéreos com $R_w > 45$ dB, a contribuição da transmissão marginal pode ter uma influência muito significativa na redução do índice em causa, não sendo assim fácil a precisão de R_w' .” [2]

O segundo critério é direcionado para elementos homogêneos e tem em conta a influência da sua espessura (Figura 7).

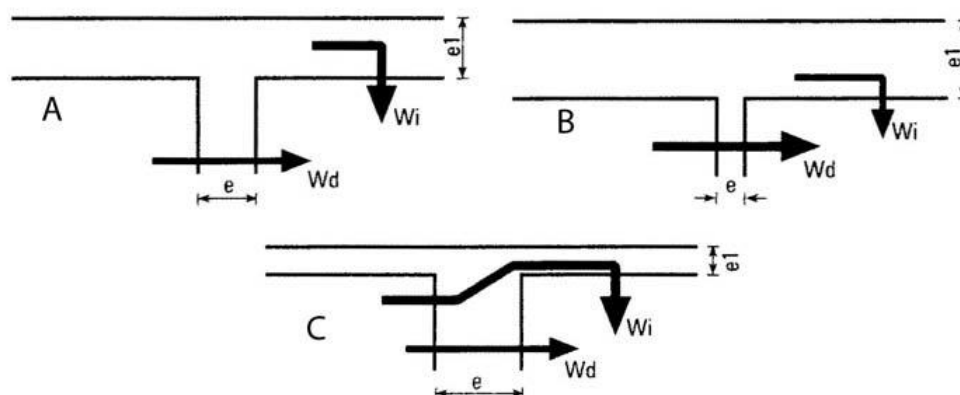


Figura 7 - Esquema exemplificativo da influência da transmissão marginal em elementos homogêneos [2]

Onde W_i e W_d correspondem à transmissão sonora que ocorre por via indireta (ou marginal) e por via direta respetivamente.

Uma vez que se tratam de elementos homogêneos e do mesmo tipo, é possível relacionar a espessura de cada elemento com a sua massa superficial, e tendo em conta que a última varia quase proporcionalmente com o isolamento sonoro conferido pelo próprio elemento é possível estabelecer as seguintes classes de contribuição e correções através da massa superficial:

- “Quando a massa superficial do elemento de separação é igual à do elemento adjacente, a transmissão que ocorre por via direta é igual à transmissão por via marginal, origina um decréscimo do isolamento sonoro em 3 dB, ou seja, $R_w' = R_w - 3$
- No caso em que a massa superficial elemento de separação é muito menor que a do elemento adjacente, a propagação ocorre maioritariamente pelo elemento de separação, resultando que as transmissões marginais são desprezáveis, ou seja, $R_w = R_w'$
- Por último, e o mais preocupante, quando a massa superficial do elemento de separação é muito maior que a dos elementos adjacentes, a transmissão sonora propaga-se maioritariamente pelos elementos adjacentes, reduzindo drasticamente a eficiência do isolamento sonoro existente no elemento de separação”[2]

Dos dois métodos anteriores compreende-se que sempre que as transmissões marginais são significativas ambos não permitem uma caracterização fidedigna da quantificação destas transmissões, limitando-se a reduzir em 3 dB o valor da redução sonora obtido em laboratório quando estas são de menor importância.

Em relação aos sons de percussão, não existem métodos expeditos de quantificação da influência das transmissões marginais, talvez pelo “facto de a influência da transmissão marginal na transposição dos valores de $L_{n,w}$ determinados com ensaios de laboratório para a obra ser normalmente mais baixa que no caso dos sons aéreos.” [2]

Dada a importância das transmissões marginais, especialmente em elementos de compartimentação que conferem isolamentos sonoros elevados, era necessário encontrar um método teórico que permitisse transpor fidedignamente os valores obtidos em laboratório para os valores obtidos “*in situ*”. O método atual encontra-se descrito na EN 12354-1 [10] para sons aéreos. Para sons de percussão a obtenção do valor dos k_{ij} é igual.

3.2 AVALIAÇÃO DAS TRANSMISSÕES MARGINAIS ENTRE COMPARTIMENTOS SEGUNDO A NORMA 12354-1

A norma EN 12354-1 [10] “Building acoustics estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 1: Airborne sound insulation between rooms” permite a previsão do isolamento sonoro através de um modelo teórico, e a avaliação das transmissões marginais que são um fator a ter em conta no cálculo do seu valor “*in situ*”.

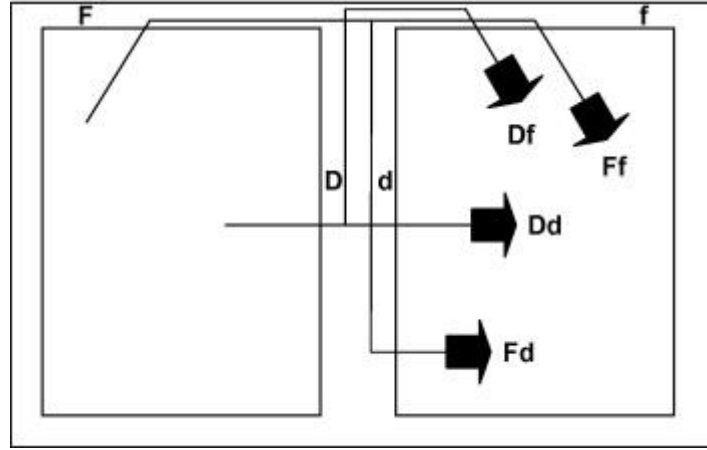


Figura 8 - Diferentes caminhos de transmissão sonora entre dois compartimentos [34]

Através da Figura 8 é possível identificar o caminho direto e os três caminhos de propagação marginais possíveis em cada ligação. As letras maiúsculas referem-se ao compartimento emissor, e as minúsculas ao compartimento recetor. Assim, Dd corresponde à transmissão direta através do elemento de separação, Df (as letras d correspondem a direct e as f a flanking) corresponde ao caminho com origem no elemento de separação que se propaga para o elemento marginal do compartimento recetor, Fd corresponde ao caminho com origem no elemento marginal do espaço emissor e propagação para o elemento de separação do lado recetor e por fim, Ff corresponde à propagação através dos elementos marginais.

Dado que só existem valores caracterizadores do isolamento sonoro obtidos em laboratório, o cálculo das transmissões marginais é feito através dos valores da redução sonora R_w pela equação (11).

$$D_{nT,w} = R_w + 10 \log \frac{T}{T_0} \quad (11)$$

A norma EN12354-1 apresenta o cálculo das transmissões marginais através de duas formas, o método detalhado e o método simplificado.

Através do método simplificado, o valor de R'_w é obtido através da soma das contribuições de todos os caminhos indicados na Figura 8. No caso de compartimentos adjacentes, o caminho direto mais três caminhos marginais por cada um dos elementos da envolvente do elemento de separação (laje de piso mais as quatro paredes laterais) perfazendo treze caminhos.

$$R'_w = -10 \log \left(10^{\frac{-R_{Dd,w}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{\frac{-R_{Ff,w}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{\frac{-R_{Df,w}}{10}} + \sum_{F=f=1}^n 10^{\frac{-R_{Fd,w}}{10}} \right) \quad (12)$$

Onde n corresponde ao número de elementos marginais (geralmente quatro). O valor de $R_{Dd,w}$ é igual ao R_w uma vez que se trata da transmissão sem efeito das transmissões marginais e os valores para os caminhos marginais são dados pelas equações seguintes:

$$R_{Ff,w} = \frac{R_{F,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Ff,w} + K_{Ff} + 10 \log \frac{S_s}{l_0 l_f} \quad (13)$$

$$R_{Fd,w} = \frac{R_{F,w} + R_{S,w}}{2} + \Delta R_{Fd,w} + K_{Fd} + 10 \log \frac{S_s}{l_0 l_f} \quad (14)$$

$$R_{Df,w} = \frac{R_{S,w} + R_{f,w}}{2} + \Delta R_{Df,w} + K_{Df} + 10 \log \frac{S_s}{l_0 l_f} \quad (15)$$

Em que:

- $R_{i,w}$: índice de redução sonora para o elemento i (dB)
- $R_{j,w}$: índice de redução sonora para o elemento j (dB)
- $R_{S,w}$: índice de redução sonora para o elemento de separação (dB)
- $\Delta R_{ij,w}$: acréscimo de isolamento sonoro no caminho ij (caso de revestimentos adicionais)

Quando há dois revestimentos no percurso, deve-se contabilizar 100% do maior e metade do menor. [3]

- K_{ij} : índice de redução de transmissão de vibrações pelo caminho ij (dB)
- S_s : superfície do elemento de separação (m^2)
- l_f : comprimento comum entre o elemento de separação e o marginal (m)
- l_0 : comprimento de referência ($l_0 = 1m$)

3.3 MÉTODO TEÓRICO DE CÁLCULO DO ÍNDICE DE REDUÇÃO DA TRANSMISSÃO DE VIBRAÇÕES

O método de cálculo do índice de redução da transmissão de vibrações que entra nas equações (13)(14) e (15), é apresentado no anexo E da norma EN 12354-1 [10] e baseia-se numa relação mássica entre os elementos percorridos pela transmissão sonora (admite-se que as massas superficiais dos elementos marginais são iguais).

A relação da massa com o índice de redução da transmissão de vibrações depende do tipo de ligação entre os elementos. Tendo em conta que geralmente os edifícios obedecem a uma malha estrutural e de compartimentação regular, os tipos de ligação mais comuns são os tipos T e X que se apresentam na Figura 9.

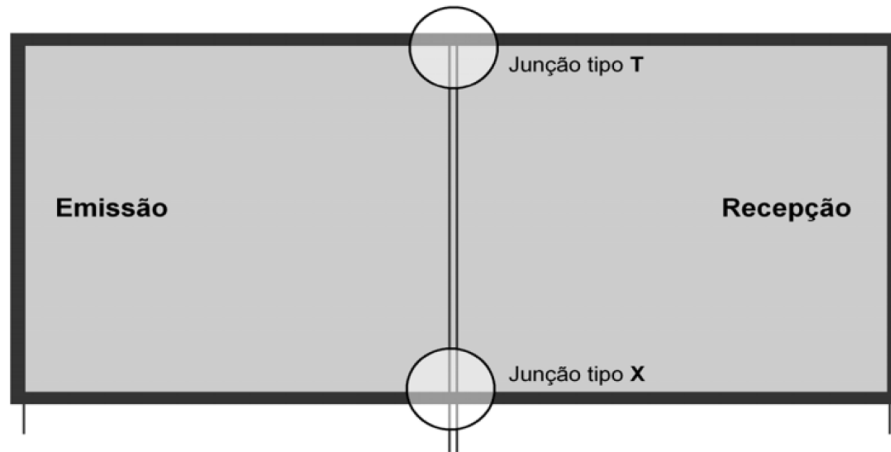


Figura 9 – Ligações tipo T e X [2]

De seguida apresenta-se a relação mássica e a contribuição de cada caminho marginal para ambos os tipos de ligação.

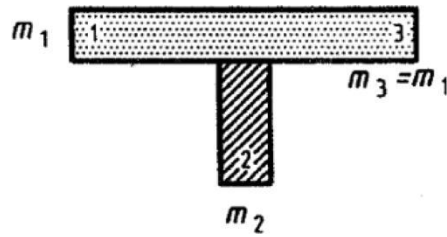


Figura 10 - Esquema de ligação tipo T [35]

$$M = \log \frac{m_2}{m_1} \quad (16)$$

Onde m_1 e m_2 corresponde às massas dos elementos marginal e de separação respetivamente.

$$k_{13} = 5,7 + 14,1M + 5,7M^2 \quad (17)$$

$$k_{12} = k_{23} = 5,7 + 5,7M^2 \quad (18)$$

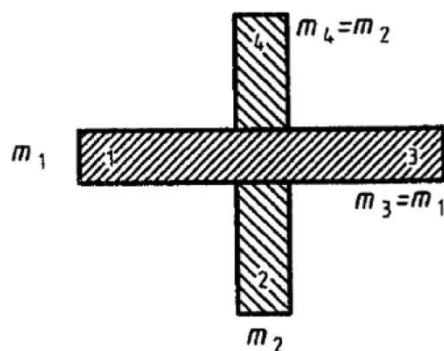


Figura 11 - Esquema de ligação tipo X [36]

$$M = \log \frac{m_2}{m_1} \quad (19)$$

$$k_{13} = 8,7 + 17,1M + 5,7^2 \quad (20)$$

$$k_{12} = k_{23} = 8,7 + 5,7M^2 \quad (21)$$

3.4 MÉTODO EXPERIMENTAL DE CÁLCULO DO ÍNDICE DE REDUÇÃO DA TRANSMISSÃO DE VIBRAÇÕES

O método experimental de cálculo do índice de redução da transmissão de vibrações realizar-se-á recorrendo à norma ISO 10848-1 [37] “Laboratory measurement of the flanking transmission of airborne and impact sound between adjoining rooms”. Como se pode depreender através do nome, esta norma é utilizada para ensaios laboratoriais. No entanto, dado que as soluções a ensaiar não serão construídas em laboratório, entendeu-se que os procedimentos poderiam ser aplicados a situações “*in situ*”.

O objetivo desta norma é caracterizar os diferentes caminhos de propagação da energia sonora através da medição das velocidades em cada elemento. A norma indica que tanto pode ser utilizada uma excitação contínua, através de uma máquina de percussão, como uma excitação transiente, através do impacto de um martelo. O segundo método foi o que se utilizou.

3.4.1 TEMPO DE REVERBERAÇÃO ESTRUTURAL

O tempo de reverberação estrutural T_s corresponde ao tempo necessário para que o nível de velocidade de um elemento decresça 60 dB após o impacto do martelo. Caso tal não seja possível, o valor pode ser obtido para decaimentos menores e extrapolado para os 60 dB.

Para a correta caracterização do tempo de reverberação é necessário realizar três pontos de excitação e medir as velocidades normais no mínimo em três pontos para cada uma. Os pontos de medição devem ser escolhidos aleatoriamente e não podem ser simétricos, devendo obedecer às seguintes distâncias mínimas:

- 0,5 m entre pontos de medição e limites do elemento
- 1 m entre ponto de excitação e respetivas medições
- 0,5 m entre medições do mesmo ponto de excitação

Através destas medições obtém-se um gráfico da velocidade em função do tempo onde é medido o decaimento mencionado. O resultado final do tempo de reverberação corresponde à média aritmética dos valores de cada elemento.

3.4.2 ÍNDICE DE REDUÇÃO DE VIBRAÇÕES

Para calcular o índice de redução de transmissão de vibrações, é necessária a obtenção do valor do sentido médio da diferença do nível de velocidade $\overline{D_{v,nj}}$ por bandas de um terço de oitava entre os 100 e os 5k Hz. Este valor é obtido por processo semelhante ao tempo de reverberação estrutural, através do impacto de um martelo e medição de velocidades normais, com a diferença que neste caso as mesmas são medidas tanto no elemento solicitado como no elemento do compartimento recetor cujo caminho se pretende caracterizar.

O ensaio é realizado efetuando um mínimo de três excitações em cada elemento e medindo-se a velocidade em três pontos do elemento solicitado e três pontos no elemento recetor, perfazendo dezoito medições por cada caminho marginal. Posteriormente realiza-se o mesmo processo trocando o elemento que é excitado para se conhecer a diferença de velocidade no sentido contrário. Os esquemas de medição para cada caminho ilustram-se na Figura 12, Figura 13 e Figura 14. Nestas figuras esquematizam-se apenas as medições necessárias para cada ponto de excitação quando o elemento excitado é a parede do piso 2.

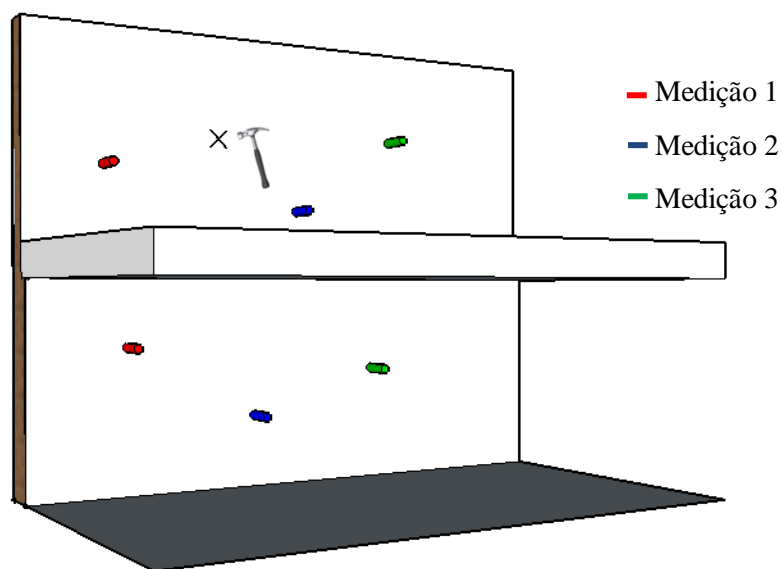


Figura 12 - Esquema de ensaio para caracterização do caminho de propagação ao longo da parede do piso 2 para a parede do piso 1

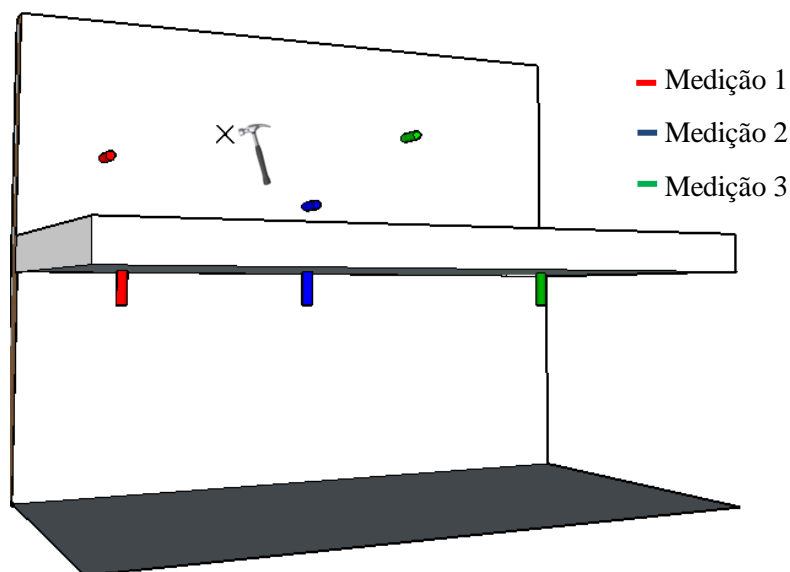


Figura 13 - Esquema de ensaio para caracterização do caminho de propagação parede piso 2/pavimento

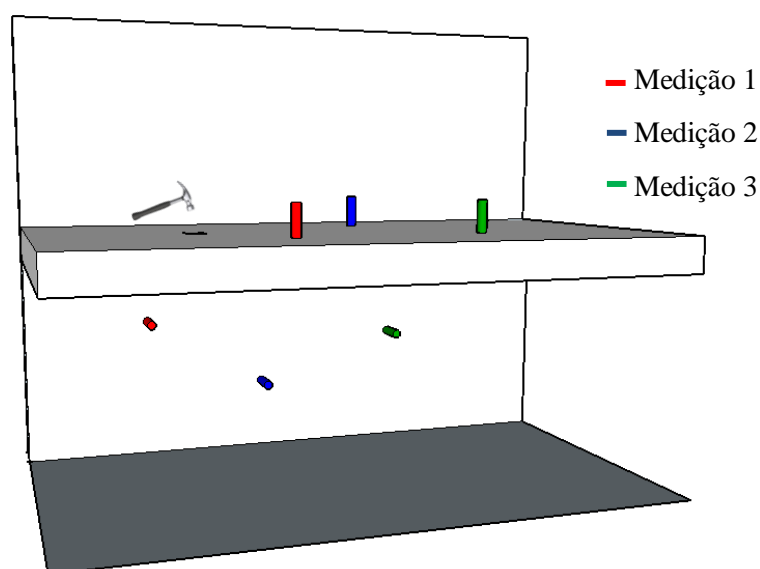


Figura 14 - Esquema de ensaio para caracterização do caminho de propagação pavimento/parede piso 1

As pancadas devem ser realizadas ao longo de 20 a 30 segundos com uma frequência entre 1 e 2 Hz e devem obedecer às seguintes distâncias mínimas (Figura 15):

- 0,5 m entre o ponto de excitação e os limites do elemento
- 1 m entre o ponto de excitação e a ligação em estudo
- 1 m entre o ponto de excitação e a respetiva medição
- 0,25 m entre pontos de medição e os limites do elemento
- 0,5 m entre pontos de medição do mesmo ponto de excitação

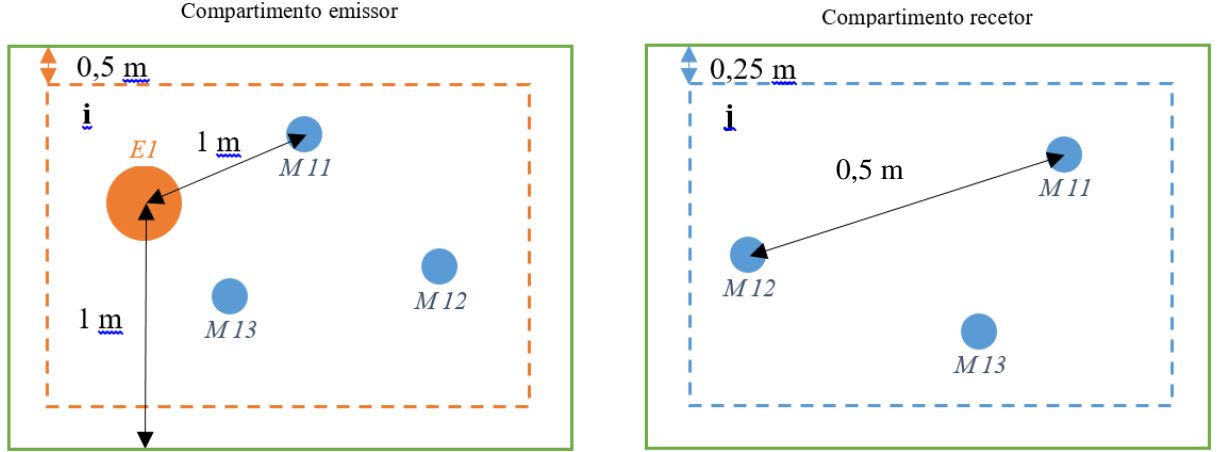


Figura 15 - Distâncias mínimas (as distâncias da figura da direita também se aplicam na da esquerda)

A distância máxima entre os pontos de medição e a ligação em estudo é de 3,5 metros e em cada banda de frequência o nível de velocidade deve ser pelo menos 10 dB superior ao ruído de fundo, caso contrário é necessário efetuar correções de acordo com a norma ISO 10140-2 [38]. Sendo que o valor da correção não pode exceder 1,3 dB.

Através dos ensaios é possível obter-se a diferença do nível de velocidade entre os pontos do elemento solicitado e os pontos do elemento do compartimento recetor para cada excitação através da expressão:

$$D_{v,ij_{mn}} = 10 \log \frac{\int_0^{T_m} v_i^2(t) dt}{\int_0^{T_m} v_j^2(t) dt} \quad (22)$$

Onde:

- T_m : tempo de integração (s)
- v_i, v_j : velocidade normal nos elementos i e j respetivamente (m/s)

O valor final da diferença do nível de velocidade entre elementos, é dado pela média aritmética dos valores anteriores. Onde M corresponde ao número de pontos de excitação, e N ao número de pontos de medição.

$$D_{v,ij} = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N D_{v,ij_{mn}} \quad (23)$$

Com base na diferença do nível de velocidade entre os caminhos ij e ji, calcula-se a média da diferença do nível de velocidade de vibração $\overline{D_{v,ij}}$ que por sua vez entra no cálculo do índice de redução da transmissão de vibrações.

$$\overline{D_{v,ij}} = \frac{1}{2} * (D_{v,ij} + D_{v,ji}) \quad (24)$$

$$k_{ij} = \overline{D_{v,ij}} + 10 * \log \frac{l_{ij}}{\sqrt{a_i * a_j}} \quad (25)$$

Sendo:

- $D_{v,ij}$: nível de velocidade médio de vibração no caminho de i para j (dB)
- $D_{v,ji}$: nível de velocidade média de vibração no caminho de j para i (dB)
- l_{ij} : comprimento comum da ligação entre os elementos i e j (m)
- a_i e a_j : comprimento de absorção equivalente do elemento i e j respetivamente (m)

$$a_j = \frac{2.2 * \pi^2 S_j}{T_{sj} * c_0 * \sqrt{\frac{f}{f_{ref}}}} \quad (26)$$

Em que:

- S_j : área superficial do elemento j (m²)
- T_{sj} : tempo de reverberação estrutural do elemento j (s)
- c_0 : velocidade do som no ar (m/s)
- f : frequência (Hz)
- f_{ref} : frequência de referência (1000 Hz)

Nos casos de elementos leves amortecidos, $a_j = S_j / l_0$ onde l_0 é igual a 1m logo $a_j = S_j$.

4

DESCRIÇÃO GERAL DO EDIFÍCIO TIPO OBJETO DE ESTUDO**4.1 EDIFÍCIOS DE VALOR PATRIMONIAL**

Segundo Ernesto Oliveira, a construção tradicional que será abordada no presente trabalho remonta aos séculos XVII, XVIII e XIX e é caracterizada por ser na sua origem uma construção “estreita e alta, que, na sua forma e sentido originários, além de derivar das construções próprias dos burgos amuralhados ou, de um modo geral, dos locais onde se verifica a necessidade ou a conveniência do adensamento da população em áreas limitadas, constitui um tipo híbrido funcional de residência urbana e estabelecimento comercial ao mesmo tempo, referidos à mesma família, estritamente utilitário” [39].



Figura 16 - Ilustração da construção tradicional do Porto [40]

O tipo de construção mais comum era a construção em banda com as paredes de meação e de fachada, com espessuras médias compreendidas entre os trinta e os setenta centímetros. Estes elementos normalmente eram constituídos por alvenaria de pedra, podendo no entanto aparecer “soluções em tabique misto em pisos superiores, individuais ou comuns a duas habitações contíguas” [41]. O revestimento interior e exterior era realizado recorrendo a argamassas de saibro e cal, com acabamento estucado e pintado. A partir do século XIX começou a ser utilizado de forma mais frequente o azulejo como revestimento das paredes de fachada.

Podem ainda surgir soluções de paredes exteriores em tabique simples com revestimento e acabamento exterior composto por azulejos, soletos de ardósia ou chapa zincada. Estas soluções correspondem normalmente a pisos acrescentados.

As partes expostas das paredes de meação eram impermeabilizadas por uma camada de asfalto (Figura 17).



Figura 17 - Paredes de meação impermeabilizadas com asfalto e revestidas com reboco [39]

Os pavimentos eram compostos por um vigamento de madeira de geometria regular (pinho, castanho, ou carvalho), assente nas paredes de meação ou num frechal disposto ao longo das mesmas, sendo comum nas casas mais antigas a utilização de vigas na sua forma natural, sob a forma de troncos rolados (Figura 18) que eram aparados em pelo menos duas das faces de forma a melhor receberem os revestimentos dos pavimentos e dos tetos. O espaçamento entre vigas andava na ordem dos cinquenta centímetros, havendo a possibilidade de existência de tarugos espaçados de cerca de metro e meio e colocados na direção transversal às vigas.



Figura 18 – Viga sob a forma de tronco rolado

O revestimento superior dos pavimentos era realizado por tábuas de soalho com cerca de três centímetros de espessura, enquanto o revestimento inferior (ou revestimento do teto), inicialmente revestido por tabuado, mais tarde foi substituído por estuque.

Os telhados típicos deste período eram maioritariamente de quatro águas, com estrutura constituída por asnas apoiadas nas paredes de meiação e espaçadas de cerca de três metros (Figura 19).

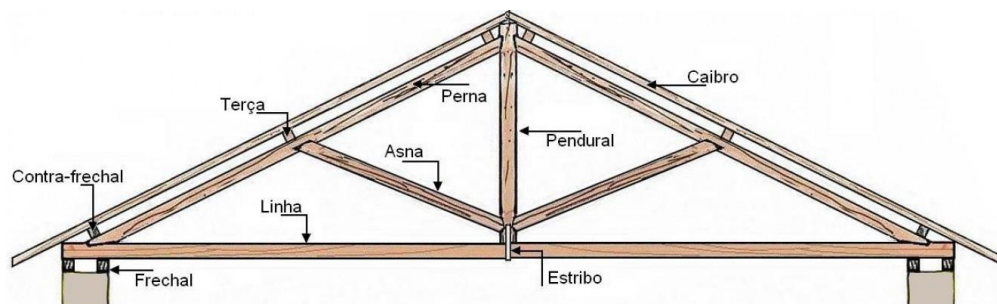


Figura 19 - Estrutura das coberturas tradicionais [42]

As paredes interiores eram constituídas por tabique simples ou tabique simples reforçado.

A ligação entre pisos era realizada por dois ou três lances de escadas sendo comum a existência de patamares intermédios. A iluminação e ventilação dos espaços interiores efetuava-se através da presença de uma claraboia existente no topo da caixa de escadas.

As paredes de fachada eram mais espessas do que as paredes de meiação de forma a combater o efeito das aberturas. Ao nível do rés-do-chão, as aberturas limitavam-se normalmente a uma porta de uma ou duas folhas de abrir, “encimadas por uma bandeira, com um caixilho envidraçado protegido por grade de ferro” [41] de forma a possibilitar a entrada de luz natural (Figura 20). Nos pisos restantes, eram compostas por janelas de vidro simples, com espessuras entre três e cinco centímetros, com caixilharia em madeira ou ferro, de batente ou de guilhotina.



Figura 20 - Porta encimada por bandeira

As janelas podiam ainda ser acompanhadas por uma proteção solar interior através de uma portada de madeira.

4.2 ELEMENTOS DE ESTUDO

4.2.1 PAVIMENTOS

4.2.1.1 ESTRUTURA

Tal como indicado no Capítulo 4.1, a estrutura dos pavimentos abordados é feita em madeira. O vigamento começa e acaba com uma viga encostada às paredes da fachada dispondo-se o restante vigamento paralelamente, ao longo da parede de meiação.

O apoio do vigamento nas paredes de meiação encontra-se na ordem dos dois terços da espessura das mesmas, havendo, no entanto, situações em que o apoio ocorre ao longo de toda a espessura.

A distância entre vigas é assegurada através do travamento por tarugos (Figura 21) colocados na direção perpendicular às vigas, o que permite não só reduzir a sua secção mas também reduzir a deformação transversal do pavimento uma vez que as obriga a trabalhar em conjunto quando solicitadas.

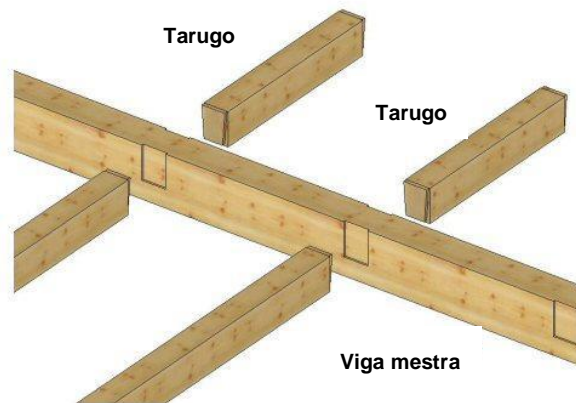


Figura 21 - Esquema do tarugamento (adaptado) [43]

4.2.1.2 REVESTIMENTO SUPERIOR

O tipo de revestimento mais comum é o soalho, estando as suas dimensões compreendidas entre os “dois centímetros e meio e os cinco centímetros, e com comprimentos que podiam atingir os dez metros” [39]. Dos vários tipos de encaixe de madeira existentes, o mais comum entre as peças de soalho é a ligação macho-fêmea pelo facto de permitir esconder o prego que fixa o soalho aos elementos subjacentes, no meio da ligação.

Em relação à fixação do soalho aos restantes elementos, existem duas formas de o fazer. Uma em que o mesmo é pregado diretamente no vigamento principal, e outra em que se recorre a uma estrutura intermédia disposta transversalmente ao vigamento, denominada de barrotes. Compreende-se, portanto, que a orientação das tábuas do soalho depende da existência ou não de barrotes, sendo paralela ao vigamento no primeiro caso e perpendicular no segundo.

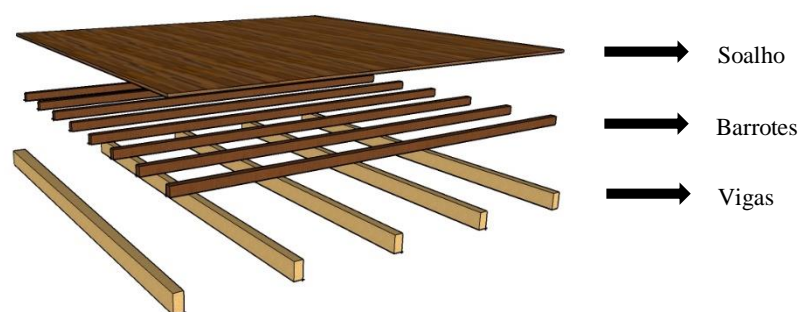


Figura 22 - Esquema das camadas superiores de pavimentos de madeira

4.2.1.3 REVESTIMENTO INFERIOR

O revestimento inferior do pavimento, ou revestimento do teto, é composto por duas camadas de peças de madeira dispostas em grelha. A primeira camada, denominada de forro é pregada diretamente ao

vigamento ou a uma camada intermédia de barrotes. Seguidamente era pregada na direção oposta, uma segunda camada de peças de madeira, denominada de fasquio.

Após a colocação desta grelha de madeira, e antes da colocação do soalho, era depositada sobre o forro uma camada de argamassa à base de saibro e cal, e de seguida uma camada de regularização sob o fasquio de forma a receber o acabamento que em soluções mais antigas era ornamentado por madeira e com o passar dos anos foi substituído pelo estuque.

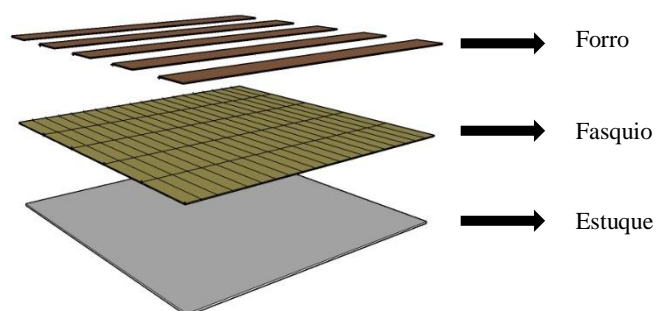


Figura 23 - Esquema das camadas do revestimento inferior de pavimentos de madeira

4.2.2 PAREDES

Os tipos de paredes que se pretende abordar, e o que são mais comuns durante o período afeto à construção alvo, eram a alvenaria de pedra e o tabique simples.

Este tipo de solução tem uma espessura reduzida e corresponde a uma estrutura de barrotes dispostos verticalmente com um espaçamento de cerca de um metro, que se apoiam diretamente no vigamento. Posteriormente são colocadas duas camadas de réguas de madeira dispostas na vertical e na diagonal que servirão para a colocação do fasquio, que por sua vez serve de apoio para a fixação do reboco.

Para efeitos de cálculo considera-se que os rodapés são desprezáveis.

5

ENSAIOS “*IN SITU*”: ISOLAMENTO SONORO A SONS AÉREOS

5.1 CASO DE ESTUDO

Inicialmente previa-se a realização de ensaios em vários edifícios com o mesmo tipo de soluções construtivas, no entanto, devido às dificuldades encontradas nos primeiros ensaios, foi apenas possível realizar ensaios num edifício.

O edifício em causa localiza-se na Rua de Santo Ildefonso e pertence ao distrito do Porto. Como veremos neste capítulo é um edifício que obedece a parte significativa das características tipo enumeradas no Capítulo 4.



Figura 24 - Edifício da Rua de Santo Ildefonso

O edifício é constituído por 3 pisos, sendo o rés-do-chão utilizado para comércio e tendo como particularidade o facto de a fachada ser enviesada face às paredes de meação.

A nível estrutural é delimitado por paredes de alvenaria de pedra, enquanto as paredes divisórias são constituídas por tabique simples, ambas com um pé direito de 3,4 m.

Os pavimentos são compostos por uma estrutura de vigas de madeira, revestidas por soalho, pregado diretamente ao vigamento e com ligação macho-fêmea. Já inferiormente são revestidos por estuque com motivos decorativos (Figura 25).



Figura 25 - Decoração do revestimento inferior do pavimento (estuque)

Ao entrar no edifício, depara-se com um longo corredor até se chegar à caixa de escadas. Esta contém patamares intermédios e é iluminada naturalmente por uma claraboia (Figura 26). Considere-se que a caixa de escadas separa o edifício em duas parcelas, uma associada à fachada principal e outra à fachada no tardoz.



Figura 26 - Claraboia sob a caixa de escadas

Descrevendo apenas a parte utilizada para ensaios no edifício, que corresponde aos espaços do lado da fachada principal do segundo para o primeiro piso, no primeiro piso encontra-se uma sala de estar (26,1 m²) que diz respeito ao compartimento recetor utilizado nos ensaios de isolamento aéreo do pavimento (Capítulo 5.2) (Figura 27). No segundo piso, a área que inferiormente acomoda a sala de estar é subdividida em dois quartos, separados por divisória de tabique simples. Importa também salientar neste espaço a presença de dois vãos envidraçados na fachada que se inserem em parte substancial da respetiva parede.



Figura 27 - Compartimentos recetor (esq.) e emissor (dir.)

O quarto maior (15,7 m²) corresponde ao compartimento emissor para os ensaios de caracterização do pavimento de madeira, e localiza-se junto à fachada. Enquanto o segundo quarto (7,2 m²), para além da porta de entrada, contém ainda duas aberturas que cobrem parte significativa das respetivas paredes, uma porta na parede de tabique simples que separa ambos os quartos, e uma janela direcionada para a caixa de escadas, na parede oposta que é constituída por tabique simples (Figura 28).



Figura 28 – Aberturas de separação entre os quartos

Em suma, o edifício encontra-se em excelentes condições para ensaio, apresentando a nível de patologias apenas humidades nos contactos entre as paredes de meação e a fachada principal, e pequenas fissuras pontuais.

5.2 ENSAIO DE ISOLAMENTO A SONS AÉREOS DO PAVIMENTO DE MADEIRA

Para além do estudo do índice de redução de vibrações em soluções construtivas tradicionais, um dos objetivos deste trabalho é o de se conhecer qual o efeito deste parâmetro no isolamento do pavimento de madeira. Por esta razão, começou-se por determinar o valor do isolamento a sons aéreos do pavimento.

A caracterização do isolamento a sons aéreos do pavimento de madeira, realizou-se de acordo com a norma EN ISO 16283-1 – Medição “*in situ*” do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção. Parte 1: Isolamento a sons de condução aérea [44].

5.2.1 EQUIPAMENTO

O ensaio consiste na criação de um campo sonoro através da reprodução de um ruído branco por parte de um altifalante (Figura 29), devendo-se garantir um valor mínimo de 100 dB na fonte. Valor que foi confirmado após cada colocação em funcionamento.



Figura 29 - Altifalante

A norma permite tanto a utilização de fontes sonoras múltiplas como de uma única fonte sonora. Uma vez que o processo utilizado foi o de uma fonte sonora singular, a norma obriga a utilização de pelo menos duas posições para o altifalante.

Após a colocação em funcionamento do altifalante, e através de um sonómetro (Figura 30), são medidos os níveis de pressão sonora durante 15 segundos em ambos os compartimentos, em bandas de um terço de oitava entre os 100 e os 3150 Hz, em pelo menos cinco posições para cada posição do altifalante, respeitando as seguintes distâncias mínimas:

- 0,7 m entre as posições do sonómetro
- 0,5 m entre a posição do sonómetro e os limites do elemento
- 1 m entre o sonómetro e a fonte sonora



Figura 30 – Sonómetro [33]

No Quadro 2 apresentam-se as especificações dos equipamentos utilizados.

Quadro 2 - Especificações do equipamento para ensaio de isolamento aéreo

Equipamento	Referência
Altifalante	EON 15 G2 [JBL]
Sonómetro	SOLO [01 dB – Metrovib]

5.2.2 MEDIÇÃO DO RUÍDO DE FUNDO

O processo de medição do ruído de fundo é em tudo semelhante ao processo anterior, com a diferença de que é medido sem a fonte sonora em funcionamento, e apenas no compartimento recetor. Bastando apenas cinco medições.

5.2.3 MEDIÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO

A medição do tempo de reverberação é realizada apenas no compartimento recetor utilizando-se como fonte sonora o rebentamento de um balão e medindo-se o tempo que o nível de pressão sonora demora a cair 60 dB. A medição do decaimento é realizada automaticamente pelo software do sonómetro.

A norma indica um número mínimo de seis registos, dois por cada posição do sonómetro, no entanto, por questões de disponibilidade do proprietário da casa no dia em que se realizaram os ensaios, necessitou-se reduzir as medições para um rebentamento para cada posição do sonómetro.

5.2.4 CÁLCULO DO ISOLAMENTO SONORO A SONS AÉREOS

Concluído o processo de obtenção de dados, procedeu-se ao cálculo do isolamento a sons aéreos do pavimento de madeira.

Começou-se por aglomerar as cinco medições por posição do altifalante num único valor, utilizando-se a seguinte expressão:

$$L = 10 * \log \left(\frac{1}{5} * \sum_{i=1}^5 10^{\frac{L_i}{10}} \right) \quad (27)$$

Onde L_i corresponde ao nível de pressão sonora em cada posição.

Utilizando como exemplo o compartimento recetor, devido a este necessitar de um passo extra como veremos em 5.2.5, da aplicação da expressão anterior resultam os seguintes valores:

Quadro 3 – Nível médio de pressão sonora (dB) no compartimento recetor para uma dada posição do altifalante

f(HZ)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k
L1	51	42,3	45,2	41,6	36	38,1	35,8	31,8	29,6	29,3	32	28,2	30,3	32,7	29,1	31,1
L2	56	47	45,5	43	40,4	40	36,2	33,8	31,6	30,5	31,9	30,9	32,7	31,3	28,3	29,9
L3	47,4	42,6	42,4	38,5	37,2	37,1	33,5	31,7	30,7	29,7	29,8	23,6	27,9	29,5	29,1	28,8
L4	44,4	42,4	41,9	41,8	38,3	37,2	33,2	32,2	30,3	29,5	31,1	26,4	27,4	31,1	26,4	29
L5	49,2	42,8	46,3	38,1	40,4	40,1	34,7	31,7	29,9	29,2	30,7	27,2	27,7	30,8	27,4	29,9
L2,1	48,4	40,9	41,6	38,0	35,8	35,7	31,8	29,3	27,5	26,7	28,2	24,9	26,7	28,2	25,2	26,8

5.2.5 CORREÇÃO DEVIDO AO RUÍDO DE FUNDO

A correção devido ao ruído de fundo apenas é realizada para o compartimento recetor e tem em vista garantir que o mesmo não afeta os resultados obtidos.

Apesar do cuidado em se realizar as medições com o mínimo de perturbações possível, existe sempre algum ruído exterior, como por exemplo o ruído do tráfego e das pessoas a falar na rua neste caso concreto.

A norma NP EN ISO 16283-1 [44] indica que o ruído de fundo deve situar-se no mínimo 6 dB abaixo do nível do sinal da ação conjunta da medição com o ruído de fundo, sendo recomendado que esteja a pelo menos 10 dB.

De modo análogo ao ocorrido no Quadro 3, o valor singular por frequência para o ruído de fundo é calculado com base na expressão 27, resultando o valor assim obtido no parâmetro L_b . O valor do nível de pressão sonora no compartimento recetor incluído do ruído de fundo é representado por L_{sb} .

O processo de correção consiste em corrigir os valores onde a diferença entre L_{sb} e L_b se situe entre os 6 e os 10 dB, em conformidade com a expressão:

$$L = 10 * \log \left(10^{\frac{L_{sb}}{10}} - 10^{\frac{L_b}{10}} \right) \quad (28)$$

Nas situações em que a diferença seja igual ou inferior a 6 dB usa-se uma correção de 1,3 dB.

Quadro 4 - Correção devido ao ruído de fundo

f(HZ)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k
RF1	47,7	41,6	36,1	35,2	29,3	25,4	27,8	27,1	25,9	33,1	37,3	33,5	35,3	38,7	35,4	35,3
RF2	37,9	41,2	40,2	37,9	33,3	32,1	28,9	28,8	26,9	28,4	30,5	24,6	28,0	27,0	23,5	23,4
RF3	42,9	40,4	38,1	37,2	35,0	32,4	29,6	29,3	28,3	27,9	29,2	24,1	26,6	25,7	22,5	22,1
RF4	42,7	39,8	37,7	38,2	35,5	32,1	28	29,5	28,0	29,5	29,4	25,8	26,7	27,0	22,8	23,8
RF5	43,9	42,8	37,3	37	35,7	33,9	29,3	30,3	28,9	27,7	23,8	20,8	19,2	19,0	17,5	16,0
Lb	41,1	38,3	35,1	34,2	31,3	28,9	25,8	26,1	24,7	26,8	29,3	25,2	27,0	29,5	26,1	26,1
Lsb2,1	48,4	40,9	41,6	38,0	35,8	35,7	31,8	29,3	27,5	26,7	28,2	24,9	26,7	28,2	25,2	26,8
Lsb2,1-Lb	7,3	2,6	6,5	3,8	4,5	6,8	6,1	3,2	2,8	-0,2	-1,1	-0,3	-0,3	-1,3	-1,0	0,7
L2,1 corrigido	47,1	39,6	40,3	36,7	34,5	34,4	30,5	28,0	26,2	25,4	26,9	23,6	25,4	26,9	23,9	25,5

5.2.6 TEMPO DE REVERBERAÇÃO

O tempo de reverberação do compartimento recetor é determinado através da medição do tempo que o nível de pressão sonora no compartimento demora a descer 60 dB após o rebentamento do balão. Tal como indicado em 5.2.2 o próprio software do sonómetro calcula diretamente este parâmetro. O valor final por frequência corresponde à média aritmética dos valores dos três (neste caso) ensaios, e apresenta-se no Quadro 5.

Nas bandas de 100 e 250 Hz optou-se por remover os valores de 1,21 e 1,01 segundos por se considerarem demasiado desfasados dos restantes.

Quadro 5 - Tempo de reverberação do compartimento recetor

f (HZ)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k
TR1	0,42	0,65	0,7	0,45	1,01	0,92	0,96	0,85	0,99	0,79	0,76	0,74	0,75	0,76	0,7	0,68
TR2	1,21	0,63	0,79	0,72	0,47	0,79	1,04	0,89	0,85	0,86	0,87	0,76	0,8	0,78	0,74	0,66
TR3	0,77	0,59	0,55	0,5	0,7	0,84	0,93	1,01	0,73	0,91	0,76	0,72	0,73	0,76	0,71	0,7
T60	0,60	0,62	0,68	0,56	0,86	0,85	0,98	0,92	0,86	0,85	0,80	0,74	0,76	0,77	0,72	0,68

5.2.7 ISOLAMENTO SONORO BRUTO

O isolamento sonoro bruto corresponde à diferença de nível de pressão sonora sentido do compartimento emissor para o recetor, tendo em conta as correções efetuadas no último devido ao ruído de fundo. Sendo $L_{1,1}$ o nível médio de pressão sonora no compartimento emissor para uma das posições do altifalante, e $L_{2,1}$ o mesmo parâmetro para o compartimento recetor, com a devida correção do ruído de fundo, o isolamento sonoro bruto é dado pela aplicação da expressão 6.

Quadro 6 - Isolamento sonoro bruto (dB) para uma dada posição do altifalante

f(HZ)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k
L1,1	71,1	68,1	72,8	70,2	73,2	74,7	76,1	75,8	75,3	74,8	72,9	72,3	74,0	73,7	72,2	76,2
L2,1 corrigido	47,1	39,6	40,3	36,7	34,5	34,4	30,5	28,0	26,2	25,4	26,9	23,6	25,4	26,9	23,9	25,5

D1	24,0	28,6	32,5	33,5	38,8	40,3	45,5	47,8	49,1	49,4	46,0	48,7	48,6	46,8	48,3	50,7
----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

5.2.8 ISOLAMENTO SONORO PADRONIZADO

Para obtenção do valor do isolamento sonoro padronizado, D_{nT} utilizou-se a expressão 9. A norma NP EN 16283-1 [44] recomenda a utilização de 0,5 segundos como tempo de reverberação de referência para edifícios de habitação mobilados, alegando que neste tipo de situação o tempo de reverberação depende pouco do volume e da frequência, e se aproxima deste valor. Utilizando este valor é então possível determinar o isolamento sonoro bruto, apresentando-se os valores para uma posição do altifalante no Quadro 7.

Quadro 7 - Isolamento sonoro padronizado (dB) para uma posição do altifalante

f(HZ)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k
D1	24,0	28,6	32,5	33,5	38,8	40,3	45,5	47,8	49,1	49,4	46,0	48,7	48,6	46,8	48,3	50,7
T60	0,6	0,6	0,7	0,6	0,9	0,9	1,0	0,9	0,9	0,9	0,8	0,7	0,8	0,8	0,7	0,7
DnT,1	24,8	29,5	33,8	34,0	41,1	42,6	48,4	50,4	51,5	51,8	48,0	50,4	50,4	48,6	49,9	52,0

5.2.9 ISOLAMENTO SONORO PADRONIZADO MÉDIO

Tendo em conta a existência de outro conjunto de valores correspondentes à segunda posição do altifalante, é necessário determinar uma média entre as duas posições da fonte. O valor final do isolamento sonoro padronizado médio é obtido por aplicação da seguinte expressão:

$$D_{nT} = -10 * \log \left(\frac{1}{2} * \sum_{j=1}^2 10^{\frac{-D_{nT,j}}{10}} \right) \quad (29)$$

Quadro 8 - Isolamento sonoro padronizado médio (dB)

f(HZ)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k
DnT,1	24,8	29,5	33,8	34,0	41,1	42,6	48,4	50,4	51,5	51,8	48,0	50,4	50,4	48,6	49,9	52,0
DnT,2	22,4	26,9	28,3	30,8	35,5	39,2	43,2	44,9	47,1	47,4	45,5	44,1	44,2	44,6	46,0	48,8
DnT	23,4	28,1	30,3	32,1	37,5	40,6	45,0	46,9	48,8	49,0	46,6	46,2	46,3	46,2	47,6	50,1

5.2.10 ÍNDICE DE ISOLAMENTO SONORO PADRONIZADO PONDERADO

Para se obter um valor único do isolamento recorre-se ao parâmetro $D_{nT,w}$, índice de isolamento sonoro padronizado ponderado, fazendo uma comparação entre a curva de diferenças de nível de pressão sonora entre os compartimentos emissor e recetor, e uma curva de referência. A curva de referência encontra-se no Quadro 9.

Quadro 9 - Curva de referência referente a sons aéreos (EN ISO 717-1)

Parâmetro	Frequência (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500
$D_{nT,w}$	1/3 Oitava	33	36	39	42	45	48	51	52
		630	800	1k	1250	1.6k	2k	2.5k	3.15k
		53	54	55	56	56	56	56	56

O ajuste é feito através de um processo iterativo onde se contabilizam as diferenças positivas entre a curva de referência e a curva de transmissão até que o seu somatório seja o maior possível sem ultrapassar o valor de 2 dB, que neste caso foi obtido à sétima iteração.

O resultado final corresponde ao valor da ordenada da curva de referência na frequência de 500 Hz, que corresponde a 46 dB conforme se verifica no Quadro 10.

Quadro 10 - Última iteração do processo de obtenção do $D_{nT,w}$

f(Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	$\sum \Delta I/16$
DnT	23,4	28,1	30,3	32,1	37,5	40,6	45,0	46,9	48,8	49,0	46,6	46,2	46,3	46,2	47,6	50,1	
CR7	27	30	33	36	39	42	45	46	47	48	49	50	50	50	50	50	2,0
$\Delta 7$	3,6	1,9	2,7	3,9	1,5	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	3,8	3,7	3,8	2,4	0,0	

6

ENSAIOS “*IN SITU*”: CARACTERIZAÇÃO DAS TRANSMISSÕES MARGINAIS

6.1 EQUIPAMENTO E SOFTWARE

6.1.1 EXCITAÇÃO TRANSIENTE

Tal como referido no Capítulo 3.4, a excitação dos elementos será efetuada através de um martelo (Figura 31).



Figura 31 - Martelo usado nos ensaios

6.1.2 ACELERÓMETRO

Apesar de a norma ISO 10848-1 [37] indicar a realização das medições do índice de redução de vibrações, recorrendo a um par de transdutores, ou seja, fazendo as leituras das acelerações (no fundo são deslocamentos como veremos no Capítulo 6.1.3) simultaneamente nos dois elementos, tal não foi possível não só porque a distância entre os mesmos é significativa, como também pela razão de que, ao ser utilizado um cabo mais comprido, a qualidade do sinal seria prejudicada. Por estas razões optou-se por fazer as medições de forma independente, sabendo-se que podem haver alterações nas condições entre ensaios, mas admitindo-se que estas são, à partida, pouco significativas.

Relembra-se o leitor que no Capítulo 3 referiu-se os ensaios de transmissões, como sendo medições de velocidades, no entanto, no parágrafo anterior, estas foram associadas a acelerações. A explicação pelo sucedido tem a ver com o equipamento disponível para a realização dos ensaios, ser apenas o

acelerómetro (Figura 32). No Capítulo 6.3.4 descreve-se o procedimento para transformação dos dados obtidos para velocidades.

As características deste equipamento apresentam-se no Quadro 11.



Figura 32 - Acelerómetro

Quadro 11 - Características do acelerómetro

Marca	PCB Piezotronics
Referência	352C68
Sensibilidade	106.2 mV/g
Gama de frequências	5-10000 Hz

6.1.3 ANALISADOR

O analisador corresponde ao equipamento que efetua a leitura dos deslocamentos sentidos pelo acelerómetro, e os converte em acelerações que de seguida são convertidas num sinal digital e enviadas para o computador. Regista tanto as acelerações em função do tempo, que servem para determinação do tempo de reverberação estrutural, como acelerações em função da frequência, que são utilizadas como informação de entrada (após passagem para velocidades, Capítulo 6.3.4) para cálculo do índice de redução de vibrações.

O Quadro 12 descreve as características do equipamento.

Quadro 12 - Características do analisador

Marca	PCB Piezotronics
Referência	480E09
Número de canais	1

Gama de frequências 0,15-100 kHz ("Gain" = 1)

6.1.4 SOFTWARE

O Software utilizado para análise do sinal recebido pelo analisador foi o programa SignalCalc Ace com a configuração que se apresenta no Quadro 13.

Quadro 13 - Configuração do SignalCalc Ace

Avg Type	Off
Overlap	0 %
Trigger	Free Run
Pacing	Off
F Span	5000
Lines	25600
mV/EU	106.200
Range	9,416
EU	G
Ace Filter (Hz)	0,5

6.2 TEMPO DE REVERBERAÇÃO ESTRUTURAL

6.2.1 PROCEDIMENTO E CONSIDERAÇÕES

O procedimento de ensaio para determinação do tempo de reverberação estrutural pode ser consultado no Capítulo 3.4.1. No presente capítulo efetua-se apenas a descrição de algumas opções tomadas aquando do ensaio e apresenta-se o conjunto de operações seguidas para obtenção do respetivo valor.

Durante da realização do ensaio surgiram algumas limitações que não permitiram a utilização rigorosa das indicações da norma ISO 10848-1 [37], nomeadamente as distâncias mínimas realizadas na parede de tabique.

Relembra-se o leitor que no Capítulo 5.1 se salientou a existência de uma porta na parede de tabique entre os dois quartos. Esta abertura faz com que a área disponível de parede não permita respeitar essas distâncias. Por conseguinte optou-se por realizar, neste elemento, uma excitação e duas medições.

6.2.2 CÁLCULO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO ESTRUTURAL

Através dos dados recolhidos pelo analisador resultam dados de acelerações em função do tempo. Neste caso, pelas configurações apresentadas no Quadro 13, trata-se de acelerações em G, sendo necessário como primeiro passo efetuar a sua multiplicação por 9,81 N para serem transformadas em acelerações.

Pegando no exemplo de uma medição numa parede de meação (Anexo A) deveriam resultar gráficos semelhantes à Figura 33, no entanto, o procedimento de ensaio para o cálculo das transmissões marginais

permite a utilização dos resultados para a determinação do tempo de reverberação estrutural, como tal, este parâmetro foi calculado com base nesses valores.

No Capítulo 6.3 faz-se uma explicação mais pormenorizada da obtenção de dados, para já interessa perceber que desses ensaios resultaram intervalos de 5 segundos onde ocorrem 4 a 5 pancadas, tornando-se necessária a sua individualização para obtenção de um gráfico semelhante à Figura 33. Como a energia transferida ao longo dessas pancadas não é constante, utilizaram-se 3 dessas pancadas e efetuou-se uma média aritmética do tempo de reverberação estrutural.

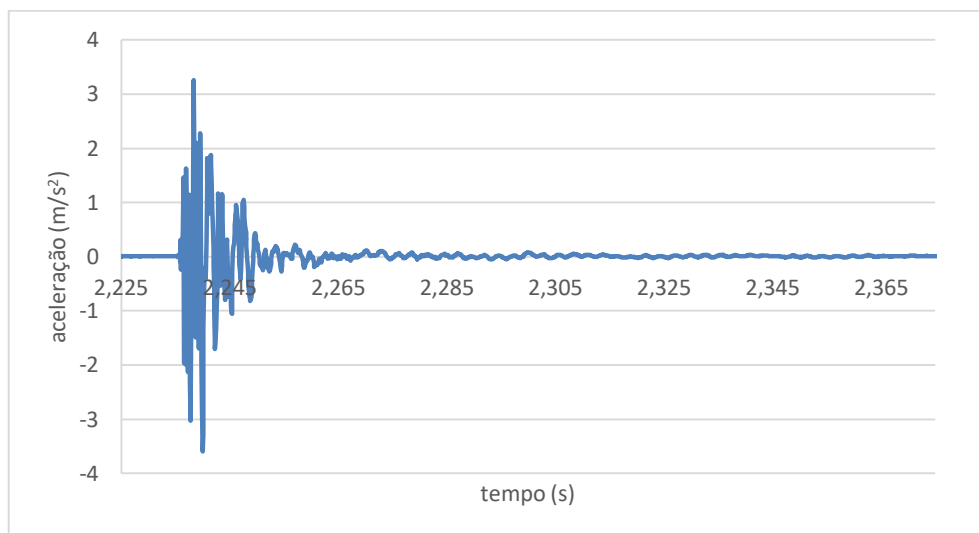


Figura 33 - Aceleração em função do tempo

O tempo de reverberação estrutural corresponde ao tempo que após uma pancada, o nível de aceleração decresce 60 dB, portanto é necessário transformar as acelerações em nível de aceleração. Para tal é utilizada a seguinte expressão:

$$L_a = 10 * \log \left(\frac{a}{a_0} \right) [31] \quad (30)$$

Onde:

- L_a : nível de aceleração (dB)
- a : aceleração (m/s^2)
- a_0 : aceleração de referência ($a_0 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}^2$)

Após a aplicação da expressão anterior, os gráficos passam a representar a evolução do nível de aceleração em função do tempo.

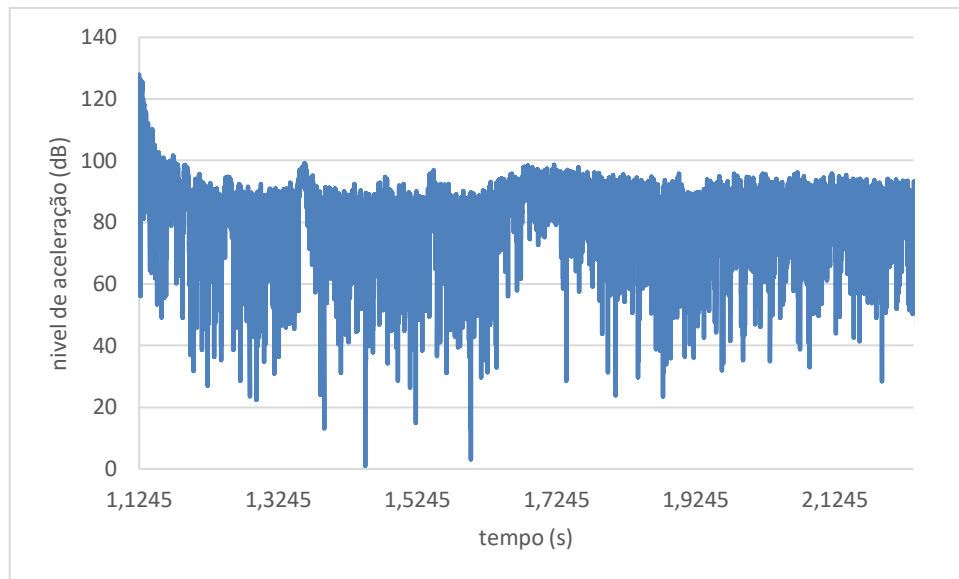


Figura 34 - Nível de aceleração em função do tempo

Com base neste gráfico, inicia-se o processo de obtenção do tempo de reverberação estrutural.

Em nenhum dos gráficos obtidos foi possível obter o decaimento de 60 dB, tendo sido utilizado maioritariamente um decaimento de 30 dB.

A norma ISO 10848-1 [37] indica a utilização da norma ISO 3382 [45] para determinar o tempo de reverberação estrutural, limitando a análise da curva de decaimento ao intervalo de tempo entre -5 dB e -35 dB abaixo do valor máximo do nível de aceleração, no caso do T_{30} (-5 e -25 para o T_{20}).

Quando a parede é excitada entra em movimento oscilatório cujo centro corresponde à sua posição natural. Por conseguinte, o acelerómetro mede acelerações tanto positivas como negativas, fazendo com que o gráfico varie de pontos máximos para pontos mínimos sucessivamente. A curva de decaimento, tal como o nome indica, é uma curva que decresce ao longo do tempo, por esta razão é necessário tratar os dados anteriores de forma a se obter um gráfico mais ou menos decrescente, para isso uniram-se os pontos máximos do gráfico da Figura 34. A Figura 35 representa o gráfico dos valores máximos sucessivos do nível de aceleração em função do tempo, entre o intervalo de tempo entre -5 e -35 abaixo do valor da pancada.

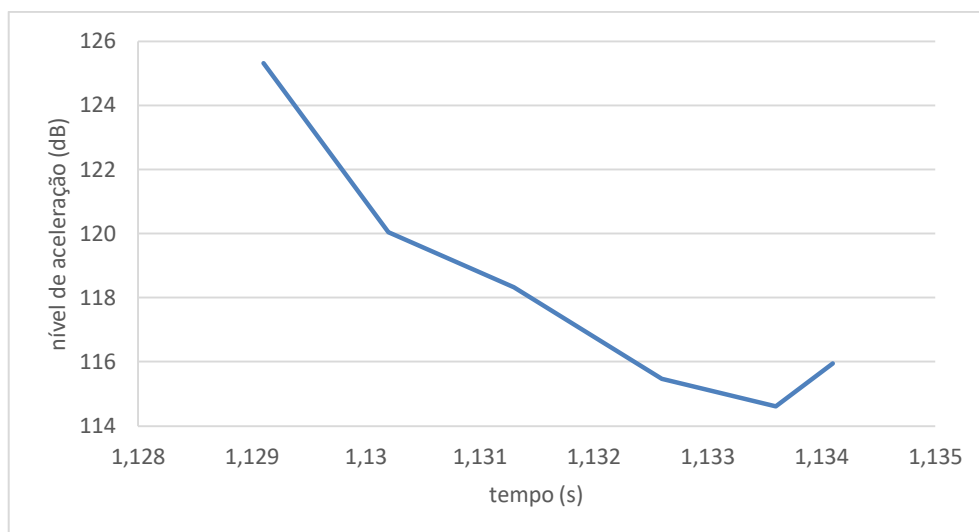


Figura 35 - Evolução do nível de aceleração em função do tempo, no intervalo indicado pela norma ISO 3382

A curva anterior não permite fazer uma interpolação, torna-se necessário recorrer a uma linha de tendência reta que represente, de forma aproximada, o decaimento da curva (Figura 36).

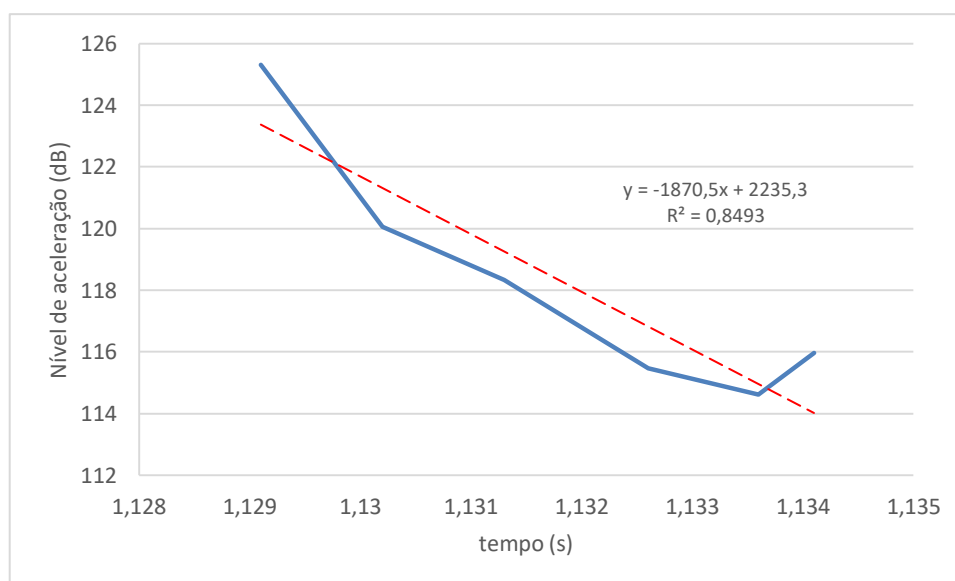


Figura 36 - Reta de decaimento

Por substituição do valor máximo da curva da Figura 34, na expressão da linha de tendência, obtém-se a sua respetiva abcissa, 1,121 neste caso, e depois do valor do nível de aceleração para um decaimento de 60 dB, ou seja, 61,52 dB, resulta o valor final do tempo de reverberação estrutural desta medição, 0,047 s.

O valor final do tempo de reverberação de cada elemento é dado pela média aritmética de todos os valores do tempo de reverberação obtidos nesse elemento, 0,034 s.

6.3 TRANSMISSÕES MARGINAIS

6.3.1 CONSIDERAÇÕES

A determinação das transmissões marginais revelou-se um procedimento de alguma complexidade uma vez que foram encontrados alguns obstáculos.

Os primeiros ensaios de transmissões marginais nas paredes de alvenaria não foram conclusivos. De forma a perceber-se de forma mais controlada o comportamento das paredes de alvenaria, foram realizados ensaios, em ambiente laboratorial, em paredes de alvenaria com e sem reboco, tendo-se concluído que a excitação tem de ser efetuada diretamente nos blocos de alvenaria (Anexo A).

Previamente, a excitação tinha sido realizada começando no reboco (3 cm) e à medida que se iam fazendo os ensaios, e o reboco saindo, as pancadas tanto eram dadas na alvenaria como no reboco, traduzindo-se em comportamentos bastante díspares aos obtidos em laboratório, não só devido às excitações em materiais diferentes, como pelo facto de a espessura do reboco absorver significativamente a pancada.

A fixação do acelerómetro nos elementos é realizada através da utilização de cera de abelha. Sendo o estuque muito antigo essa fixação tornou-se um obstáculo dado que o mesmo não tinha capacidade de segurar o acelerómetro e saía colado à cera de abelha. Para além disso, o facto de o compartimento ter um pé direito bastante alto agravava a situação, uma vez que a tensão no cabo que liga o acelerómetro ao analisador era maior por ação do seu peso próprio.

Tentou-se diminuir a tensão e melhorar a fixação do acelerómetro recorrendo a fita-cola mas nem sempre foi bem-sucedido, tendo sido necessário em alguns casos uma terceira pessoa ajudar a segurar na fita-cola.

Outra das limitações encontradas tem a ver com o aviso, por parte do vizinho, de que as excitações durante a repetição dos ensaios estavam a provocar estragos na sua habitação, nomeadamente a queda de objetos decorativos.

Por estas razões realizaram-se apenas duas medições para um ponto de medição em cada elemento aquando a repetição dos ensaios.

As dificuldades descritas para a fixação do acelerómetro no teto, também se manifestaram nas paredes devido ao papel de parede e idade do reboco, que não se seguravam e saíam colados à cera de abelha. No entanto a utilização de fita-cola como auxílio revelou-se uma opção melhor sucedida.

De forma a evitar danificar o estuque do teto, utilizou-se uma tábua de madeira para a excitação não ser realizada diretamente no mesmo.

6.3.2 LOCALIZAÇÃO DOS ENSAIOS E DESCRIÇÃO DOS CAMINHOS DE PROPAGAÇÃO

O isolamento que se pretende caracterizar corresponde ao isolamento entre os compartimentos que contêm a fachada, do segundo para o primeiro piso, que são limitados pela fachada, duas paredes de meiação, e uma divisória de tabique.

Posto isto, para se conhecer o efeito que os caminhos de transmissão marginal têm sobre o isolamento entre os espaços é necessário caracterizar 3 ligações (admite-se que ambas as paredes de meiação são iguais, logo o índice de redução de vibrações também é igual).

A localização dos ensaios realizados encontra-se representada na Figura 37.

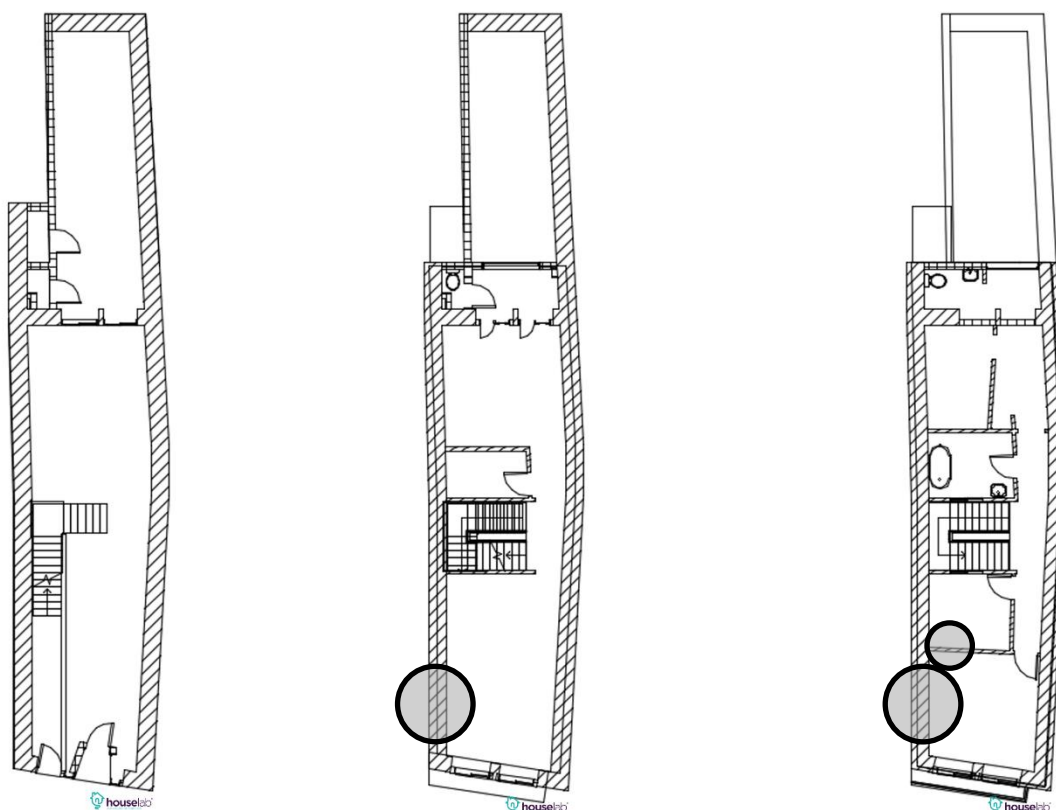


Figura 37 - Localização dos ensaios. R/C (esq.), Piso 1 (centro), Piso 2 (dir.)

Na Figura 8, descreveu-se de forma geral os 3 caminhos existentes em cada ligação. Para este caso concreto apresenta-se no Quadro 14 a descrição dos caminhos de propagação através da ligação entre a parede de meação e o pavimento, onde a origem corresponde ao elemento no espaço emissor, e o destino no espaço recetor.

Importa também referir que o Quadro 14 descreve os caminhos numa situação em que o elemento excitado se encontra no piso 2. Relembra-se o leitor que os ensaios foram realizados utilizando apenas um acelerómetro, portanto, para determinação da diferença de velocidade quando o elemento excitado se encontra no Piso 1, a origem e o destino são inversos aos apresentados neste quadro. O mesmo acontece no Quadro 15, sendo que para o tabique a inversão é realizada dependendo se o elemento excitado se encontra do lado do compartimento que contém a fachada.

Na Figura 38 efetua-se a representação esquemática da ligação em causa.

Quadro 14 - Descrição dos caminhos marginais na parede de meação

Caminho	Origem	Destino
k_{12}	Parede de meação	Teto
k_{13}	Parede de meação do piso 2	Parede de meação do Piso 1

k_{23} Pavimento para parede de meação do piso 1 Parede de meação do Piso 1

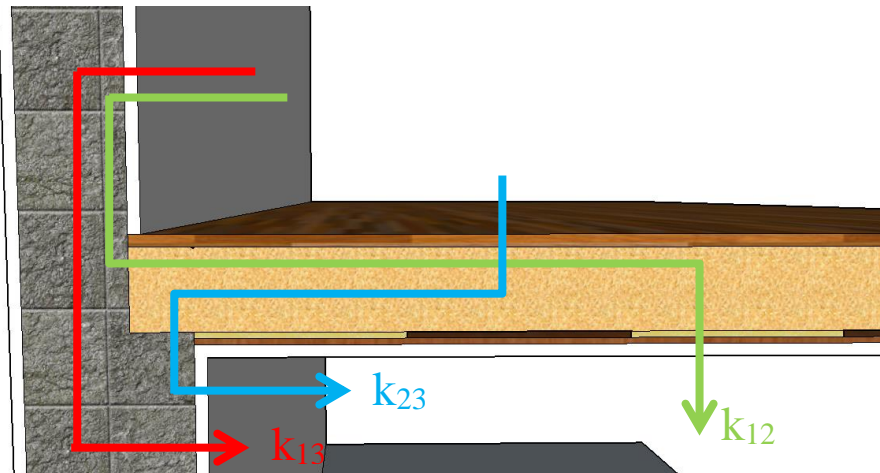


Figura 38 - Pormenor construtivo da ligação entre a parede de meação e o pavimento

Dada a existência dos dois vãos envidraçados que se referiu, e uma vez que a área disponível para ensaio era muito reduzida, optou-se por não realizar a caracterização dos caminhos existentes na parede de fachada.

Por último, apresenta-se a mesma informação para a parede de tabique, no Quadro 15 e na Figura 39. Este elemento contribui apenas com um caminho marginal no isolamento entre os dois compartimentos em estudo.

Quadro 15 - Descrição dos caminhos marginais na parede de tabique

Caminho	Origem	Destino
k_{23}	Tabique	Pavimento

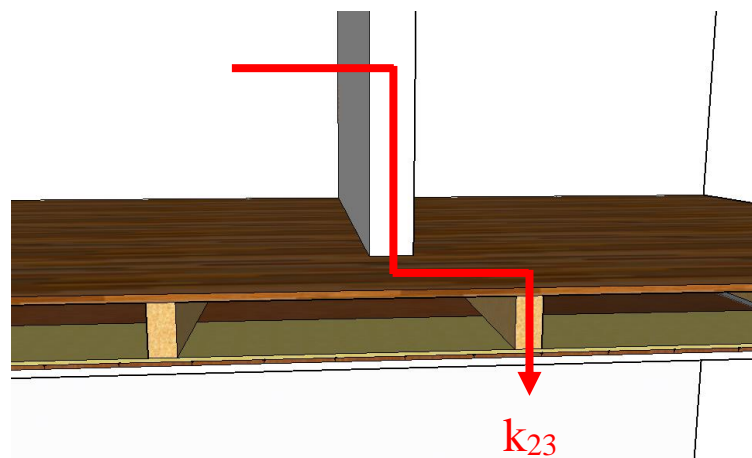


Figura 39 - Pormenor construtivo da ligação entre a parede de tabique e o pavimento

6.3.3 OBTENÇÃO DE DADOS

O processo de obtenção de dados inicia-se marcando as posições de excitação e medição de acordo com as distâncias descritas no Capítulo 3.4.2 (Figura 40). De seguida é feita a fixação do acelerómetro recorrendo a cera de abelha (Figura 41).



Figura 40 - Marcação dos pontos de colocação do acelerómetro e dos pontos de excitação (Posteriormente optou-se por não usar a chapa)



Figura 41 - Fixação do acelerómetro com cera de abelha

Por último, através do programa SignalCalc Ace é feito o registo das acelerações durante 20 a 30 segundos, ao longo dos quais se excita o elemento com uma pancada a cada segundo. No entanto, uma vez que este software não permite efetuar um registo consecutivo ao longo deste período, optou-se por

continuar a excitar a parede, e guardar o registo em períodos de 5 segundos até se perfazerem os 20 segundos mínimos, obtendo-se entre 4 a 5 conjuntos de espectros da aceleração.

6.3.4 TRANSFORMAÇÃO DE DADOS (CHAMO A ATENÇÃO PARA O CAPÍTULO SEGUINTE POIS RECEIO QUE ESTEJA ERRADO)

6.3.4.1 CÁLCULO DAS VELOCIDADES A PARTIR DAS ACELERAÇÕES

A norma EN 12354-1 [10] utiliza velocidades ao invés de acelerações, no entanto, com o equipamento utilizado, resultam acelerações por frequência e um número imaginário. Para se obterem dados em função da velocidade, em primeiro lugar é necessário calcular a amplitude por frequência, para tal calcula-se a raiz quadrada da soma do quadrado da aceleração com o quadrado do número imaginário que resulta dos ensaios. De seguida, dividem-se as amplitudes por $w * i$, onde w corresponde à velocidade angular. Para finalizar, multiplicam-se as velocidades por 9,81 para passar para m/s. Sendo $w = 2\pi f$ resulta:

$$v = \frac{\sqrt{a^2 + i^2}}{2 * \pi * f * i} * 9,81 \quad (31)$$

Onde:

- v : velocidade por frequência (m/s)
- a : aceleração por frequência (g)
- w : velocidade angular (rad/s)
- i : número imaginário (g)

6.3.4.2 AGLOMERAÇÃO NAS FREQUÊNCIAS CENTRAIS DE UM TERÇO DE OITAVA

Após obtenção das velocidades por frequência, é preciso aglomera-las nas frequências centrais de um terço de oitava. Para isso utilizaram-se as expressões seguintes:

$$f_1 \approx 0,89 * f_0 \quad (32)$$

$$f_2 \approx 1,12 * f_0 \quad (33)$$

Onde f_1 e f_2 correspondem respetivamente aos limites inferior e superior de cada banda, e f_0 à frequência central.

Daqui resultaram os intervalos de frequências que se encontram no Quadro 16.

Quadro 16 - Limites superior e inferior de cada banda de frequência de um terço de oitava

f(HZ)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k
f_1	89,0	111,3	142,4	178,0	222,5	280,4	356,0	445,0	560,7	712,0	890,0	1112,5	1424,0	1780,0	2225,0	2803,5	3560,0	4450,0
f_2	112,0	140,0	179,2	224,0	280,0	352,8	448,0	560,0	705,6	896,0	1120,0	1400,0	1792,0	2240,0	2800,0	3528,0	4480,0	5600,0

6.3.5 INTEGRAL DA VELOCIDADE

Para utilização da expressão 22 é necessário determinar o integral do quadrado da velocidade. Para isso começou-se por fazer a média aritmética, por frequência, dos vários conjuntos de 5 segundos obtidos, que posteriormente se elevou ao quadrado.

De seguida, procedeu-se ao cálculo do integral através da área do gráfico entre frequências sucessivas, fazendo-se a média do quadrado da velocidade, e dividindo-se pela diferença de frequências.

Para finalizar, fez-se a aglomeração dos valores dos integrais do quadrado da velocidade, nas frequências centrais de um terço de oitava.

6.3.6 DIFERENÇA DO NÍVEL DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO MÉDIO

Aplicando a expressão 22, obtém-se a diferença do nível de velocidade entre os elementos do caminho marginal em análise. No Quadro 17 apresentam-se os valores para o caminho k_{23} .

Quadro 17 – Diferença do nível de velocidade médio de vibração (k_{23})

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Dv,ijmn1	33,3	30,1	36,9	37,8	24,6	34,5	39,0	35,0	27,0	42,4	41,3	41,2	50,5	55,0	48,4	47,9	46,8	42,4
Dv,ijmn2	33,8	39,0	32,2	32,6	31,1	32,3	35,1	38,4	36,3	45,5	47,1	52,0	53,8	56,9	56,9	59,5	55,8	54,2
Dv,jimn1	9,2	4,5	7,0	7,5	17,5	7,9	1,8	10,7	9,9	17,4	29,9	35,1	36,8	37,2	38,4	45,5	45,1	29,5
Dv,jimn2	2,0	-6,0	-2,8	-1,5	1,0	4,4	8,7	-1,0	-0,4	8,3	19,4	19,4	24,7	13,4	11,2	13,3	14,1	11,6

6.3.7 NÍVEL DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO MÉDIO

Através dos valores das diferenças do nível de velocidade médio, nos dois pontos por excitação ensaiados, obtém-se o valor singular do nível de velocidade de vibração médio ao longo do caminho k_{23} , utilizando-se a expressão 23 (Quadro 18).

Quadro 18 – Nível de velocidade de vibração médio (k_{23})

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Dv,ij	33,6	34,6	34,6	35,2	27,8	33,4	37,0	36,7	31,6	43,9	44,2	46,6	52,1	56,0	52,7	53,7	51,3	48,3
Dv,ji	5,6	-0,7	2,1	3,0	9,3	6,2	5,2	4,9	4,8	12,9	24,7	27,2	30,7	25,3	24,8	29,4	29,6	20,5

6.3.8 SENTIDO MÉDIO DA DIFERENÇA DO NÍVEL DE VELOCIDADE

No Quadro 19 apresentam-se os resultados para o sentido médio da diferença do nível de velocidade, calculados através da expressão 24.

Quadro 19 – Sentido médio da diferença do nível de velocidade (k_{23})

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
Dv,ij	19,6	16,9	18,3	19,1	18,5	19,8	21,1	20,8	18,2	28,4	34,4	36,9	41,4	40,6	38,7	41,6	40,5	34,4

6.3.9 COMPRIMENTO DE ABSORÇÃO SONORA EQUIVALENTE

O comprimento de absorção sonora equivalente corresponde ao comprimento de uma ligação fictícia totalmente absorvente quando a frequência crítica se admite ser de 1000 Hz e é dado pela aplicação da expressão 26, cujos resultados se apresentam no Quadro 20.

Quadro 20 - Comprimentos de absorção equivalente (k_{23})

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
ai	33,9	30,4	26,8	24,0	21,5	19,1	17,0	15,2	13,5	12,0	10,7	9,6	8,5	7,6	6,8	6,0	5,4	4,8
aj	125,4	112,2	99,1	88,7	79,3	70,7	62,7	56,1	50,0	44,3	39,7	35,5	31,3	28,0	25,1	22,3	19,8	17,7

6.3.10 ÍNDICE DE REDUÇÃO DE VIBRAÇÕES

O índice de redução de vibrações por frequência, resulta da aplicação da expressão 25, apresentando-se os resultados no Quadro 21.

Quadro 21 – Espectro do índice de redução de vibrações (k_{23})

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000	5000
kij	7,1	4,9	6,9	8,1	8,1	9,8	11,7	11,8	9,7	20,4	26,9	29,9	35,0	34,6	33,2	36,6	36,0	30,4

Por fim, o valor final do índice de redução de vibrações é dado pela média aritmética entre as frequências de 200 e 1250 Hz, que corresponde a 15, 2 dB.

6.3.11 SÍNTESE DE RESULTADOS

No Quadro 22 reúnem-se todos os valores obtidos para a parede de meiação, discriminados por frequência.

Quadro 22 - k_{ij} da parede de meiação

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	k_{ij}
k_{12}/f	10,5	12,8	8,8	9,1	9,3	7,5	5,3	12,3	17,4	11,6	9,2	9,5	10,8	6,7	5,6	0,8	3,2	6,7	10,1
k_{13}/f	-2,9	-7,6	-5,0	-1,5	-7,6	-9,0	-5,9	-4,6	4,3	9,1	13,8	13,6	21,3	22,4	21,7	20,4	20,2	16,9	1,4
k_{23}/f	7,1	4,9	6,9	8,1	8,1	9,8	11,7	11,8	9,7	20,4	26,9	29,9	35,0	34,6	33,2	36,6	36,0	30,4	15,2

Como se pode verificar, alguns destes valores são negativos. A norma ISO 10848-1 [37] não é clara quanto à determinação do valor singular do índice de redução de vibrações, no que diz respeito a valores negativos, pelo que se apresentam no Quadro 23 os valores finais do k_{ij} utilizando um valor nulo nestes casos.

Quadro 23 - k_{ij} da parede de meiação considerando valores negativos como zero

Caminho	k_{ij}
k_{12}	10,1
k_{13}	4,5
k_{23}	15,2

Uma vez que para o cálculo do isolamento sonoro, para além dos caminhos marginais na parede de meiação, são necessárias as contribuições dos caminhos marginais na fachada e no tabique, cujos valores não são conhecidos, optou-se pela utilização dos valores da parede de meiação para a parede de fachada. O valor do tabique, face às limitações encontradas, optou-se por colocar em anexo (Anexo B).

Posto isto, aplicando as expressões 13, 14 e 15, resultam os valores do Quadro 24.

Quadro 24 - Índice de redução sonora ponderado

Caminho	Meação	Fachada	Tabique
$R'_{Fd,w}$	70,1	71,4	-
$R'_{Ff,w}$	56,6	56,3	-
$R_{Df,w}$	71,5	71,4	57,7

Somando agora todas as contribuições marginais, ou seja, duas vezes os 3 caminhos na parede de meiação, mais os 3 caminhos na parede de fachada, e o caminho 23 na parede de tabique, através da aplicação da expressão 12 resulta um isolamento $D_{nT,w}$ de 46,7 dB.

7

ANÁLISE DE RESULTADOS

7.1 INTRODUÇÃO

O objetivo principal desta dissertação é a comparação dos resultados obtidos experimentalmente, quer através da medição direta do isolamento sonoro entre os dois compartimentos em análise, quer da aplicação das normas de ensaio existentes para a discriminação e determinação das transmissões marginais e do isolamento sonoro, com os valores teóricos desenvolvidos para soluções construtivas homogéneas.

Neste capítulo começa-se pela apresentação do cálculo dos valores teóricos, e de seguida, discutem-se os resultados obtidos nos ensaios, e as questões que se levantaram ao longo de todo o processo.

7.2 DETERMINAÇÃO DOS VALORES TEÓRICOS DO ÍNDICE DE REDUÇÃO DE VIBRAÇÕES

A partir das expressões teóricas de obtenção do índice de redução de vibrações da norma EN 12354-1 [10] apresentadas no Capítulo 3.3, procedeu-se ao cálculo do valor esperado para este índice, e para o índice de isolamento sonoro padronizado ponderado $D_{nT,w}$.

Para este cálculo utilizaram-se para valores das massas superficiais e redução sonora, os valores do Quadro 25.

Quadro 25 - Massas superficiais e redução sonora

Elemento	Massa Superficial (kg/m ²)	Redução sonora (dB)
Parede de alvenaria	420	50
Pavimento	140	45,6
Tabique	64	38

Nos quadros seguintes apresentam-se os resultados obtidos, sendo que para valores negativos se tomou o valor do índice de redução de vibrações como zero. Entre parêntesis apresenta-se o valor real obtido.

Quadro 26 – k_{ij} teórico para parede de meação

Caminho	k_{ij} teórico
k_{13}	0,3
k_{12}	7,0
k_{23}	7,0

Analogamente, dado que se utilizou a mesma massa superficial da parede de meação, o valor do k_{ij} para os diferentes caminhos na parede de fachada é dado pelo Quadro 27.

Quadro 27 – k_{ij} teórico para a parede de fachada

Caminho	k_{ij} teórico
k_{13}	0,3
k_{12}	7,0
k_{23}	7,0

Por fim, os valores para o mesmo parâmetro afetos à parede de tabique apresentam-se no Quadro 28.

Quadro 28 – k_{ij} teórico para a parede de tabique

Caminho	k_{ij} teórico
k_{13}	1,5
k_{12}	6,4
k_{23}	6,4

Aplicando agora as expressões 13, 14 e 15, obtêm-se os valores do Quadro 29 para ao índice de redução sonora ponderado.

Quadro 29 - Redução sonora da parede de meação

Caminho	Meação	Fachada	Tabique
$R_{Ff,w}$	56,6	56,5	-
$R_{Fd,w}$	61,1	61,1	-
$R_{Df,w}$	61,1	61,1	53,5

Tendo em conta todas as contribuições existentes, ao longo dos elementos que limitam ambos os compartimentos, nomeadamente, os 3 caminhos marginais na parede de meação (2 vezes) e na de fachada, e o caminho Df no tabique, ou seja, a transmissão que ocorre da parede de tabique, para o teto do primeiro piso, resultam uma redução sonora aparente de 41,5 dB, e um índice de isolamento sonoro padronizado ponderado de 43,4 dB.

7.3 DISCUSSÃO DOS VALORES OBTIDOS PARA OS K_{ij}

7.3.1 COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES OBTIDOS AO LONGO DO CAMINHO 12 E 23

Nos elementos homogêneos, facilmente se compreende que as transmissões marginais ao longo dos caminhos 12 e 23, são iguais, visto que as vibrações se propagam através dos mesmos elementos, variando apenas o sentido da propagação. Em soluções tradicionais, devido à sua heterogeneidade, o mesmo não se verifica, tendo sido obtidos valores 50,5% superiores no caminho 23.

Na Figura 44 apresentam-se as curvas de desenvolvimento do nível de velocidade médio de vibração ao longo da frequência. Através da análise do gráfico, verifica-se que as curvas 23 e 32 apresentam um comportamento idêntico ao longo da frequência, sendo que o nível de velocidade médio se mantém mais ou menos constante até aos 630 Hz e depois cresce rapidamente, ou seja as perdas de velocidade quando o som atravessa as diferentes camadas do pavimento são mais significativas a partir dos 630 Hz.

Analisando o caminho 12, o som faz o seu percurso ao longo da parede de meação, e passa para o pavimento através das vigas que por sua vez transmitem para o forro, fasquio e revestimento, já no caminho 23, é o soalho que transmite para as vigas, que por sua vez transmitem para a parede de meação. A conclusão que se chega é que existem mais perdas no revestimento superior do que no inferior. Verifica-se também que a partir dos 800 Hz, as perdas de velocidade no soalho são superiores às perdas no revestimento inferior do pavimento, por comparação dos valores nos caminhos 12 e 32.

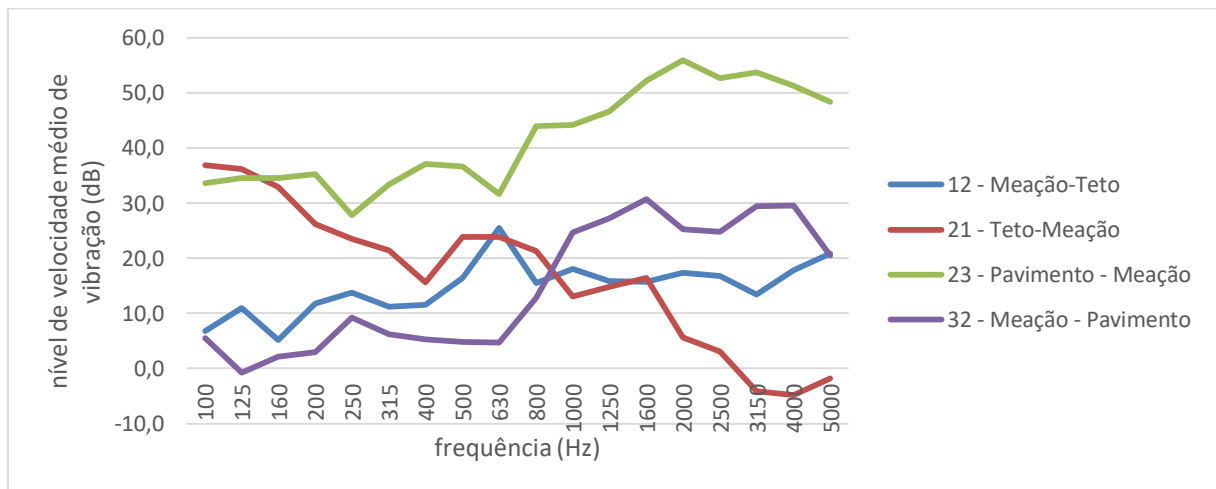


Figura 42 - Comparação entre o nível de velocidade nos caminhos 12 e 23

Analisando agora o sentido médio da diferença do nível de velocidade nos dois caminhos, verifica-se que nas frequências de interesse mais altas, para o valor singular do k_{ij} , as velocidades são superiores quando o elemento excitado é o pavimento (Figura 45), resultando daqui a disparidade entre as transmissões marginais nos dois caminhos.

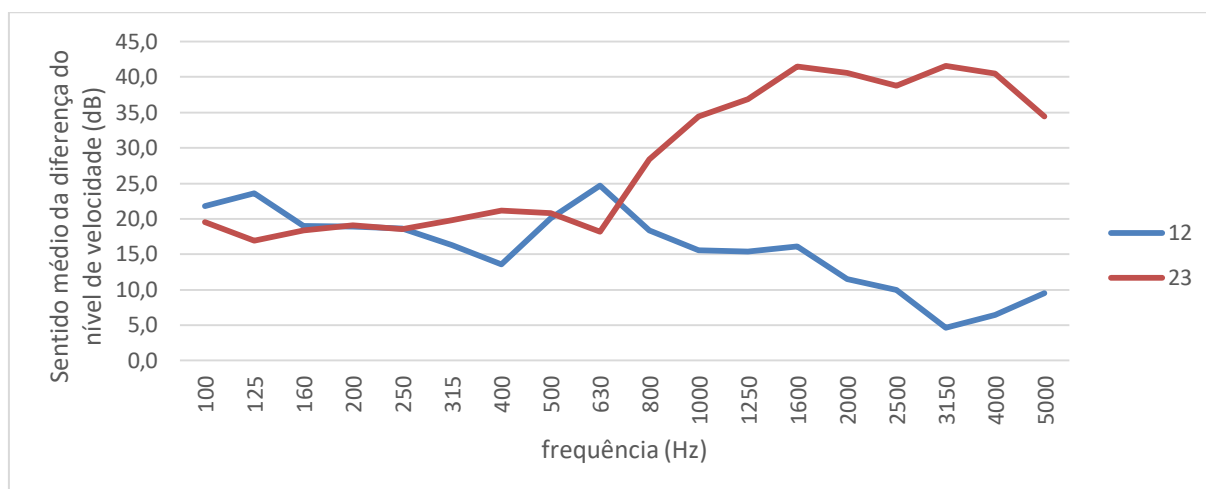


Figura 43 - Comparação do sentido médio da diferença do nível de velocidade

7.3.2 ANÁLISE DOS VALORES OBTIDOS PARA O CAMINHO 13

Por observação da Figura 46, percebe-se a existência de valores negativos nas baixas frequências, este fato depreende-se ser o resultado da complexidade de vibração das paredes de meiação. A existência de valores negativos nas paredes de meiação, significa que foram obtidas velocidades superiores no elemento recetor, do que no emissor, o que não faz muito sentido, assim sendo, acredita-se que este fenómeno resulte dos modos próprios de vibração deste tipo de parede, resultando numa grande variação das velocidades obtidas, dependendo dos pontos de medição escolhidos.

O facto de a norma 10848-1 [37] impor distâncias mínimas aos limites dos elementos, diminui a influência deste fenómeno porque diminui a área de medição, no entanto, dado que as paredes são bastante altas, a variação das velocidades nas várias direcções da parede ganha ainda mais importância.

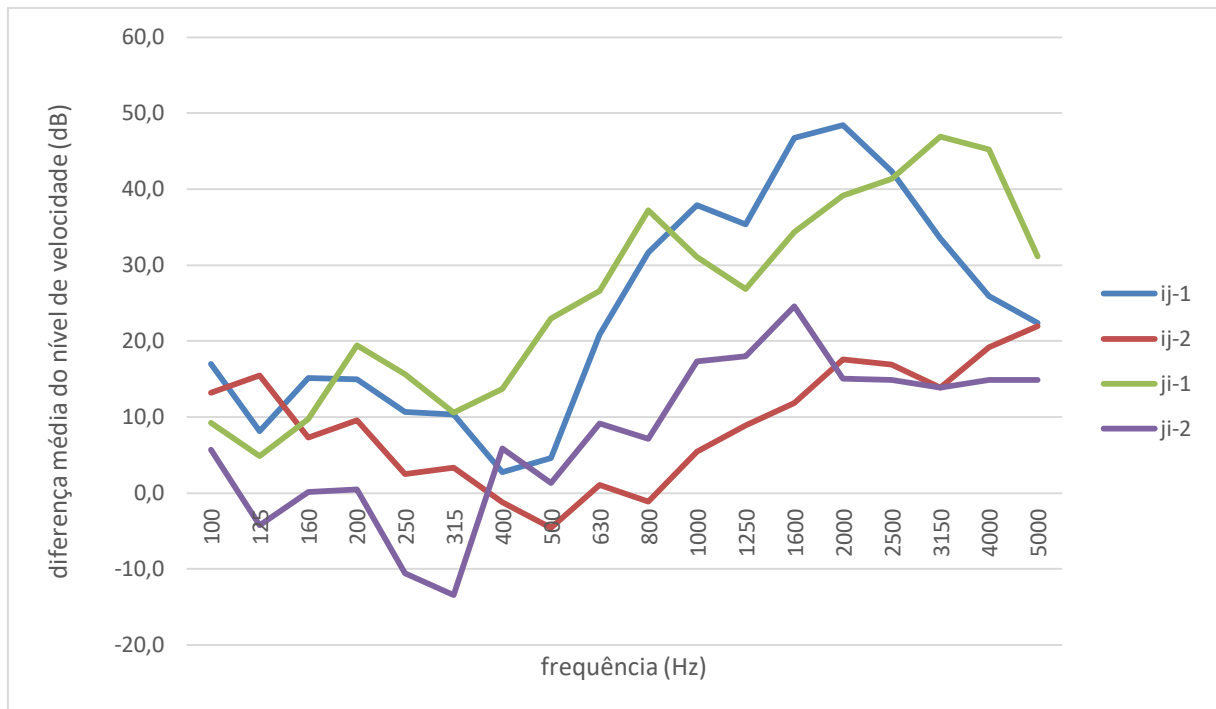


Figura 44 - Diferença média do nível de velocidade no caminho 13

7.3.3 COMPARAÇÃO DOS ÍNDICES DE REDUÇÃO DE VIBRAÇÕES OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE, COM OS VALORES TEÓRICOS

O parâmetro definidor, das diferenças entre os valores de isolamento sonoro obtidos através da caracterização “*in situ*” dos diferentes caminhos marginais, e do valor do isolamento sonoro obtido pela aplicação do método teórico proposto na norma 12354-1 [10], é a correta caracterização do valor do índice de redução de vibrações. Posto isto apresentam-se os respetivos valores no Quadro 30.

Quadro 30 – k_{ij} teórico vs k_{ij} experimental da parede de meiação

Caminho	k_{ij} teórico		k_{ij} experimental	
k_{13}	0,3	4%	4,5	64%
k_{12}	7,0	100%	10,1	144%
k_{23}	7,0	100%	15,2	217%

As percentagens apresentadas no Quadro 30 foram calculadas com base no valor de 7 dB, para uma melhor comparação entre os valores.

Analisando os resultados deste quadro, percebe-se que o modelo teórico de cálculo do k_{ij} não se adequa minimamente a soluções heterogéneas.

Por aplicação do modelo teórico para quantificação das transmissões marginais, no dimensionamento do isolamento, verifica-se pela observação do quadro, que um projetista iria considerar que praticamente não existe qualquer transmissão ao longo dos elementos verticais, o que é falso dado que existe uma

transmissão de mais de metade da contribuição que obteria nos outros caminhos. Nos outros caminhos, cometeria um erro ainda maior, uma vez que os valores são significativamente superiores aos valores teóricos, no entanto, a gravidade seria menos significativa porque usualmente o isolamento é colocado no elemento de separação.

7.4 COMPARAÇÃO DOS VALORES DO $D_{nT,w}$

Após a verificação de que os valores do índice de redução de vibrações obtido por medições “*in situ*”, e o mesmo parâmetro obtido pelas expressões teóricas, é bastante diferente, interessa agora avaliar a importância dessa variação no valor final do isolamento entre os compartimentos. Na Figura 47 comparam-se os valores do isolamento sonoro obtidos através destas duas medições, e ainda o obtido experimentalmente.

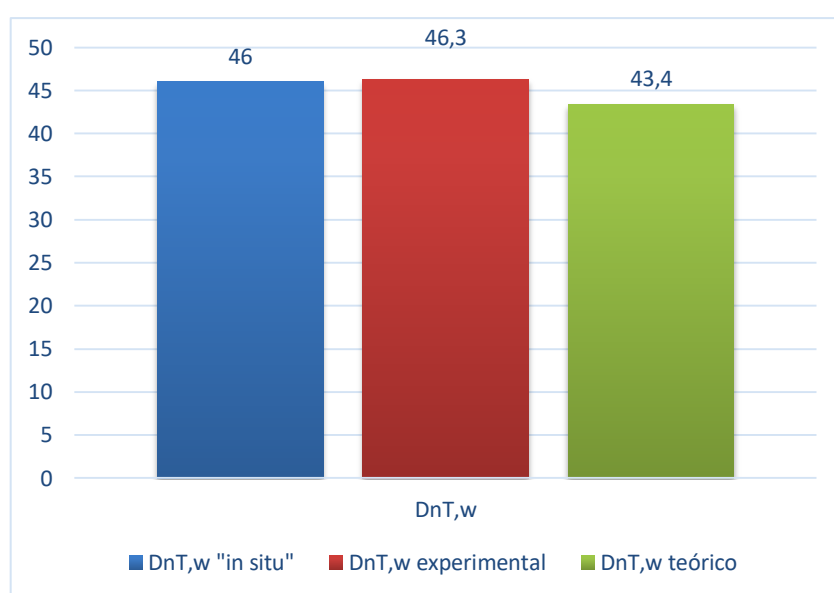


Figura 45 - Comparação entre os vários valores do $D_{nT,w}$

Analisando estes dados, verifica-se que apesar da disparidade entre os valores dos k_{ij} ser significativa, a sua influência no valor final do isolamento é reduzida, correspondendo a um acréscimo de 0,65% e um decréscimo de 5,7 % face ao valor retirado diretamente dos níveis de pressão sonora, respetivamente para o $D_{nT,w}$ experimental e teórico, ou seja, uma variação total de 6,4% face ao valor “*in situ*”.

O facto de se ter usado o valor teórico para o caminho 23 no tabique, não tem uma grande influência nestes valores. No anexo B apresentam-se os valores obtidos nas ligações entre os dois compartimentos do segundo piso, utilizando como exemplo o valor do caminho 23 nesta situação (19,6 dB em substituição dos 6,4 dB), ou seja, o caminho do tabique para o pavimento do quarto lateral, que deverá ser semelhante ao que vai do tabique para o teto do primeiro piso, em que se utilizou o valor teórico, o valor final do $D_{nT,w}$, altera-se apenas para 46,9 dB, ou seja, 1,96% superior ao valor “*in situ*”.

Recomenda-se portanto, aumentar em cerca de 2,5 dB o valor do isolamento obtido através do modelo teórico, uma vez que, apesar de conduzir a um valor conservador, é possível reduzir o sobredimensionamento do isolamento.

7.5 VALIDAÇÃO DO TEMPO DE REVERBERAÇÃO ESTRUTURAL

A determinação do tempo de reverberação estrutural foi realizada através das medições para as transmissões marginais, em vez de se terem realizado ensaios isolados. Por esta razão interessa testar a validade dos resultados obtidos, para isso recorreu-se ao cálculo do tempo de reverberação estrutural a partir de fatores de perdas teóricos existentes em [3] (Quadro 31).

$$T_s = \frac{2,2}{f * \eta} \quad (34)$$

Quadro 31 - Fator de perdas teórico

Elemento	η
Parede de meiação	0,005-0,02
Pavimento	0,008

Da aplicação desta expressão resultam os valores do Quadro 32.

Quadro 32 - Tempo de reverberação estrutural teórico

f (Hz)	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1k	1.25k	1.6k	2k	2.5k	3.15k	4k	5k	Média
$T_{s[0,005]}$	4,40	3,52	2,75	2,20	1,76	1,40	1,10	0,88	0,70	0,55	0,44	0,35	0,28	0,22	0,18	0,14	0,11	0,09	1,17
$T_{s[0,02]}$	1,10	0,88	0,69	0,55	0,44	0,35	0,28	0,22	0,17	0,14	0,11	0,09	0,07	0,06	0,04	0,03	0,03	0,02	0,29
$T_{s \text{ pavimento}}$	2,75	2,20	1,72	1,38	1,10	0,87	0,69	0,55	0,44	0,34	0,28	0,22	0,17	0,14	0,11	0,09	0,07	0,06	0,73

Avaliando os valores do tempo de reverberação calculados, 0,034 s e 0,09 s respetivamente para a parede de meiação e para o pavimento, conclui-se que estes valores são bastante inferiores aos valores teóricos, pelo menos 8 vezes inferiores. Isto traduz-se num aumento do $D_{nT,w}$ “*in situ*” para 47,6, ou seja 3.5% superior ao valor experimental.

8

CONSIDERAÇÕES FINAIS

8.1 SÍNTESE GERAL

Após a realização deste trabalho de investigação, que tem como objetivo principal a análise comparativa dos valores do isolamento sonoro, obtidos através de três processos distintos, através da medição direta dos níveis de pressão sonora entre os compartimentos, do cálculo através da caracterização das transmissões marginais por medições “*in situ*”, e pelo modelo teórico, assume-se que os objetivos, no geral, foram cumpridos uma vez que, apesar da existência de algumas limitações, os resultados obtidos para o valor do isolamento apresentam pouca variabilidade.

O quadro seguinte, que se reproduz do Capítulo 7, sintetiza de forma muito concreta os resultados obtidos a partir dos quais se tiram as conclusões deste trabalho.

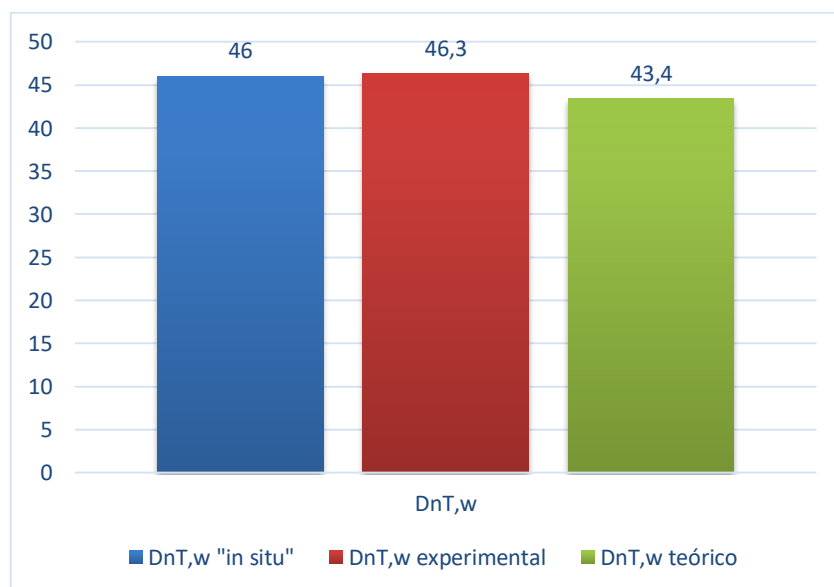


Figura 47 - Comparação entre os vários valores do DnT,w

A variação de resultados, neste caso concreto, que se assume ter alguma representatividade mas que não pode ser tomado como generalista, mostra que os resultados obtidos pelos três métodos acabam por ser muito próximos, com uma ligeira diferença para os resultados obtidos pelo método teórico dos k_{ij} . Conclui-se que é assim possível responder à questão de investigação ou seja, sim, o método constante

da norma EN 12354-1 é aplicável à situação de transmissão marginal em paredes de meação de edifícios antigos.

8.2 PROBLEMAS

Muitas questões ficaram ainda no ar, começando pelos ensaios, as limitações devido às áreas disponíveis para ensaio, aliadas às dificuldades com o equipamento, não permitiram efetuar as 9 medições por elemento, o que permitiria discutir com mais conforto os resultados. Apesar disso, o facto de as variações no valor dos isolamentos serem reduzidas, ao contrário do que acontece no valor dos k_{ij} , diminui a importância que a variação que pudesse ocorrer entre as medições, influencie significativamente os valores obtidos.

Ainda sobre os ensaios, seria importante a existência de normalização específica para a realização dos mesmos em elementos como os analisados. Para além das pancadas não fornecerem ao elemento excitado a mesma energia porque são dadas manualmente, existem dúvidas se as pancadas têm de ser dadas diretamente nos blocos da alvenaria, ou se podem ser dadas no revestimento. No presente caso, visto que o reboco era anormalmente espesso e se encontrava já em fracas condições, através da análise dos gráficos obtidos durante os ensaios concluiu-se que as pancadas deveriam ser dadas diretamente na alvenaria, mas em situações normais pode não ser necessário fazer ensaios tão destrutivos.

Outra das questões levantadas diz respeito à existência de valores superiores no elemento recetor, face aos medidos no elemento emissor, a única explicação encontrada deve-se ao modo próprio de vibração das paredes de alvenaria, que se acredita variar significativamente em todas as direções, levando a grandes variações nas velocidades medidas e consequentemente alguns resultados anormais.

Em relação ao método de ensaio propriamente dito, a irregularidade da superfície das paredes de meação, e o estado dos revestimentos demonstrou ser um dos maiores entraves na realização dos ensaios, revelando-se um processo muito mais moroso do que o inicialmente previsto. Posto isto, a utilização de equipamentos que contornem estes obstáculos, seria uma enorme mais-valia.

Após a análise do cálculo dos tempos de reverberação estrutural, conclui-se também que deveria existir um método normalizado para o cálculo deste parâmetro, uma vez que os resultados obtidos são significativamente inferiores aos obtidos através dos valores de fatores de perdas teóricos, no entanto, a sua influência nos resultados finais é reduzida.

8.3 RECOMENDAÇÕES PARA DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Face às limitações encontradas durante a realização dos ensaios, a recomendação principal que se faz é a repetição dos ensaios utilizando equipamentos mais adequados a este tipo de edifícios.

Para além do estudo em mais edifícios de forma a corroborar os valores obtidos, seria também importante o estudo do comportamento das paredes de fachada e tabique, em que a existência de aberturas não condicione significativamente os ensaios, ao contrário do edifício que se analisou.

Um dos aspetos que se acredita ser de enorme significância para a área abordada, seria o estudo dos modos de vibração de paredes de alvenaria. Apesar de complexo, o conhecimento do comportamento deste tipo de elementos permitiria uma melhor comparação entre as velocidades obtidas nos diferentes elementos, e consequentemente uma melhor aproximação aos valores reais das transmissões marginais.

Em relação ao modelo teórico, seria interessante analisar a influência da variação das massas dos elementos no valor dos k_{ij} teóricos, uma vez que as massas utilizadas são resultado de suposições que

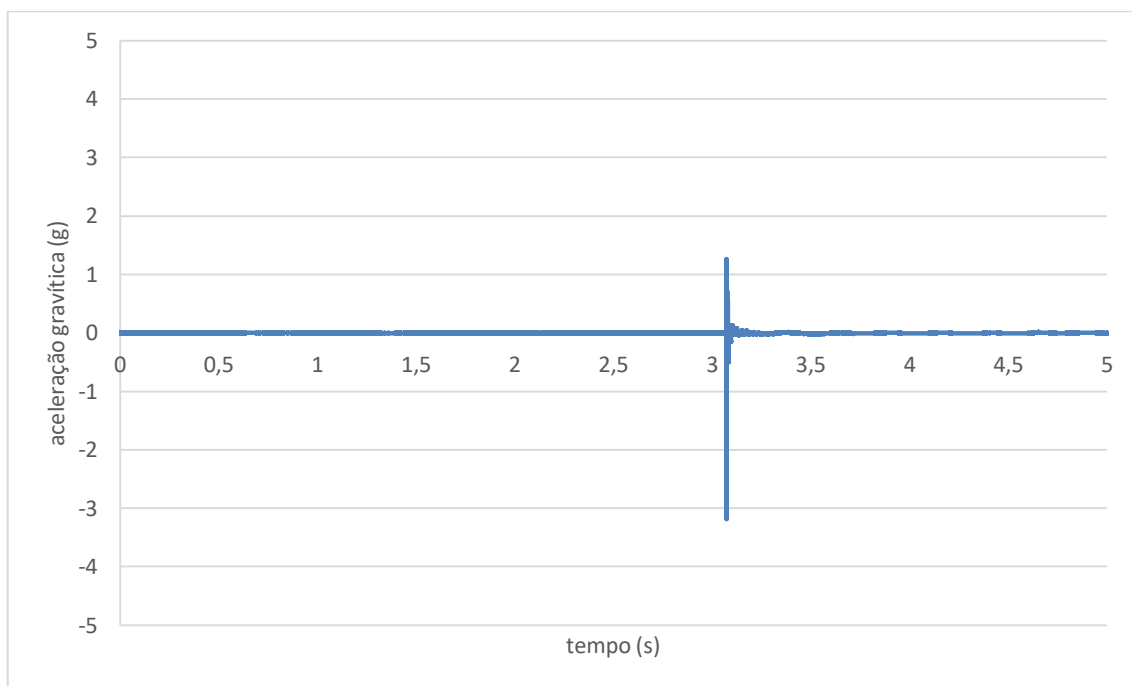
se julgaram próximas das existentes neste género de edifício, e podem não corresponder às soluções existentes.

Anexo A

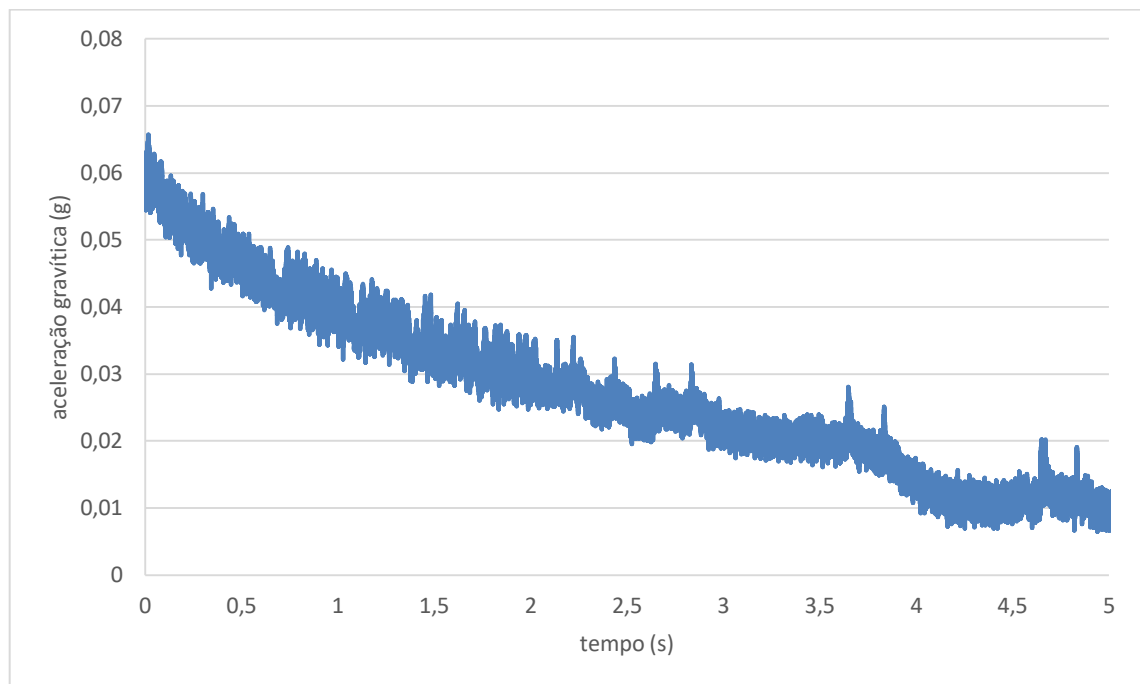
Resultado dos ensaios realizados em ambiente laboratorial

A.1. SEM REBOCO (90X180 cm)

A.1.1. BLOCO NA HORIZONTAL A 30 CM DE DISTÂNCIA

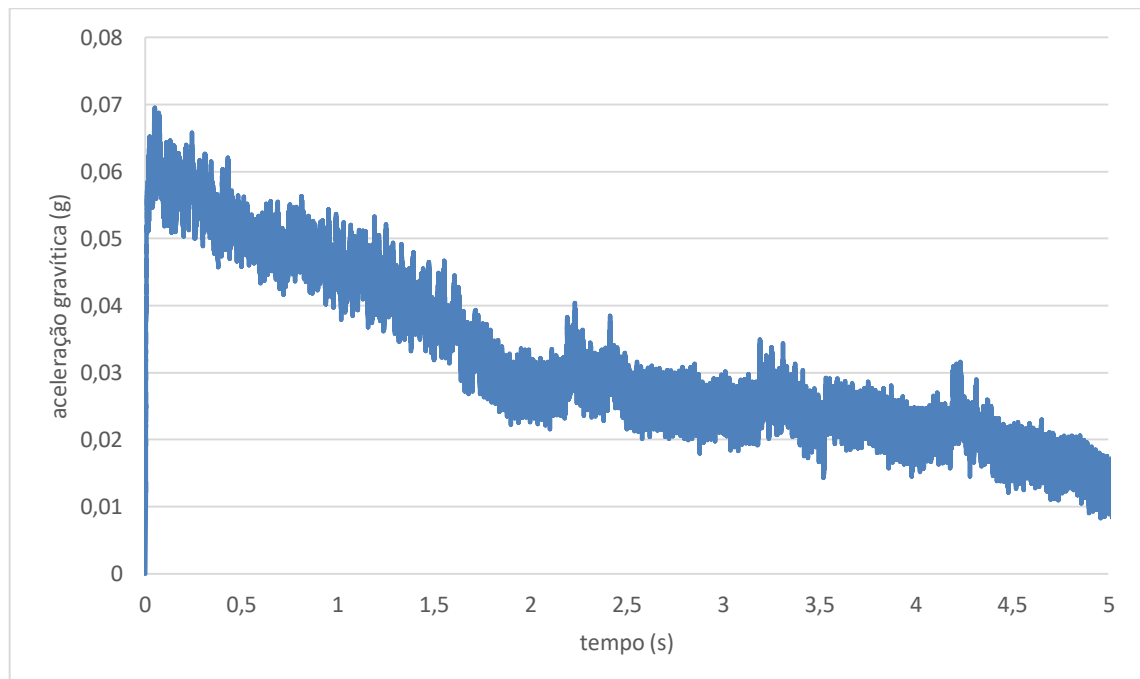


A.1.2. BLOCO NA VERTICAL A 47 CM DE DISTÂNCIA

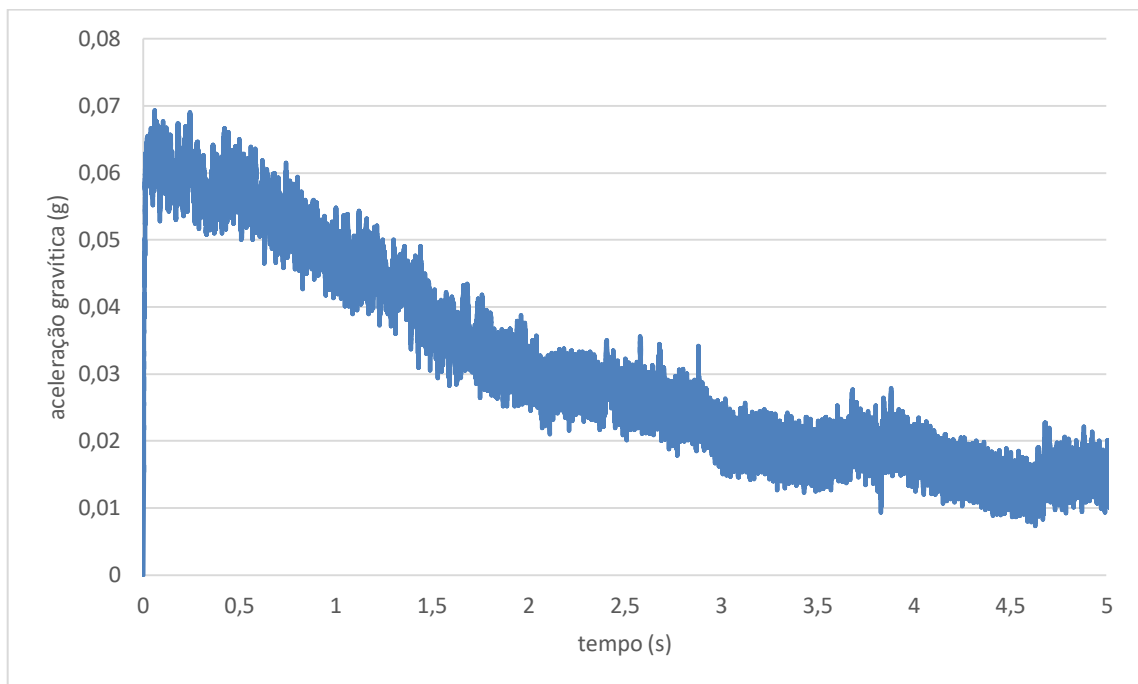


A.2. COM REBOCO (130*250 CM)

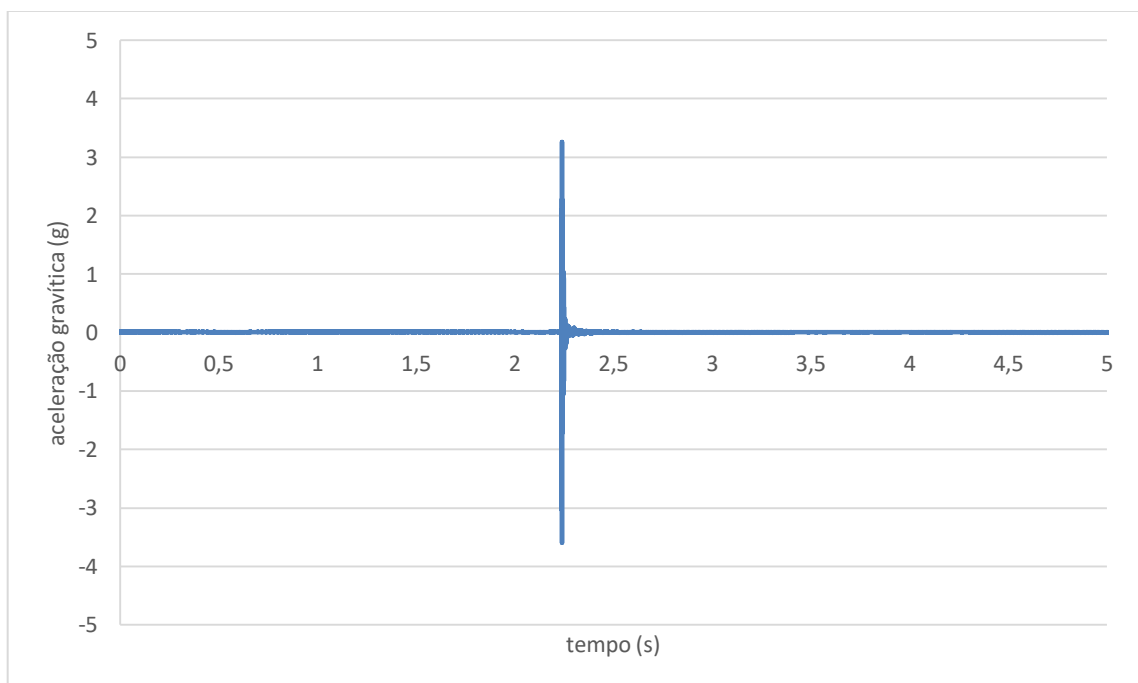
A.2.1. BLOCO NA HORIZONTAL A 80 CM DE DISTÂNCIA



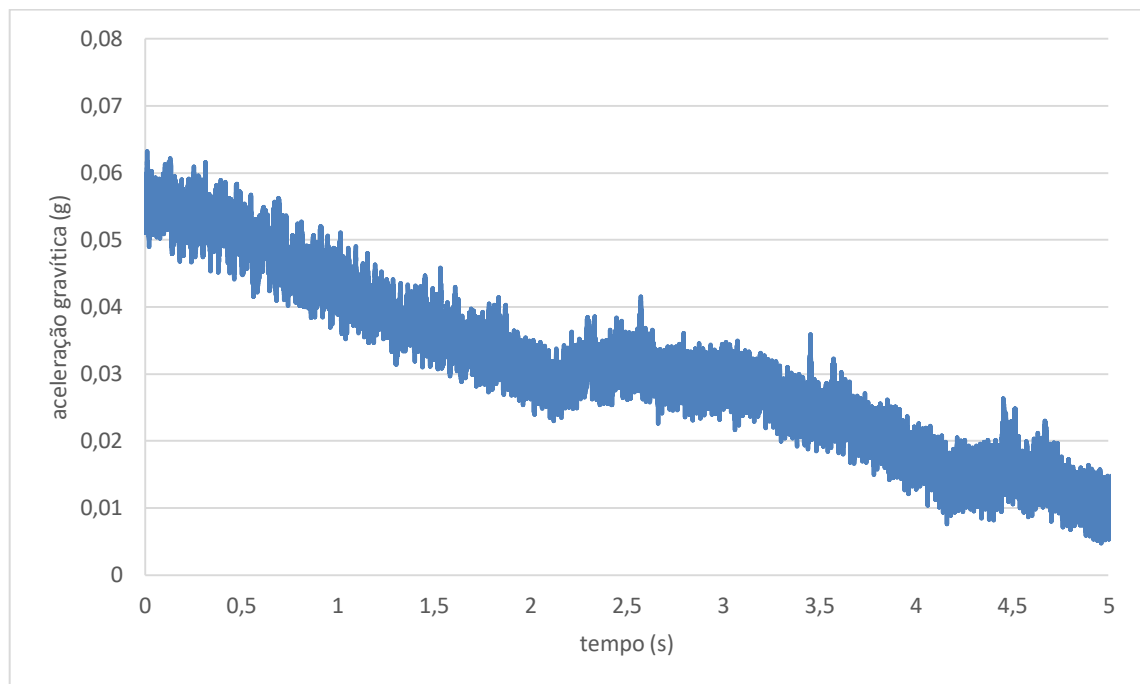
A.2.2. BLOCO NA VERTICAL A 71 CM DE DISTÂNCIA



A.2.3. BLOCO NA VERTICAL A 37 CM DE DISTÂNCIA



A.2.3. BLOCO NA DIAGONAL A 77 CM DE DISTÂNCIA



Anexo B

Índice de redução de vibrações no tabique

B.1. ÍNDICE DE REDUÇÃO DE VIBRAÇÕES NO TABIQUE

Durante a realização dos ensaios na parede de meação, foram também efetuadas as medições na parede de tabique, no entanto, dado a existência de uma grande abertura na parede, e a área de ensaio ser bastante reduzida, optou-se por incluir os valores apenas em anexo. Apresentam-se então no quadro seguinte os valores obtidos, lembrando que se deve olhar para estes valores com a devida cautela.

Tabela 1 - k_{ij} no tabique

Caminho	k_{ij}
k_{12}	21,6
k_{13}	5,1
k_{23}	19,6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <http://sicnoticias.sapo.pt/pais/2016-02-28-Doze-em-cada-100-portugueses-expostos-a-ruído-que-afeta-o-sono>. Acedido a 1 de Abril de 2017.
- [2] Patrício, Jorge (2008). *Acústica nos Edifícios*. Verlag Dashöfer, Chipre.
- [3] Oliveira de Carvalho, Paulo (2015). *Acústica Ambiental e de Edifícios*. FEUP Edições, Porto, 2015.
- [4] <http://www.imperial.ac.uk/cms/wp-content/uploads/2014/08/sons.gif>. Acedido a 1 de Abril de 2017.
- [5] <http://www.usra.ca/images/specularreflection.jpg>. Acedido a 1 de Abril de 2017.
- [6] <http://raft.education/wp-content/uploads/2016/10/Attenuation-2.png>. Acedido a 1 de Abril de 2017.
- [7] https://www.nrc-cnrc.gc.ca/ctu-sc/ctu_sc_n66. Acedido a 7 de Fevereiro de 2017.
- [8] Gerretsen, Eddy (1979). *Calculation of the sound transmission between dwellings by partitions and flanking structures*. Applied Acoustics.
- [9] Gerretsen, Eddy (1986). *Calculation of airborne and impact sound insulation between dwellings*. Applied Acoustics.
- [10] EN ISO 12354-1 (2000). *Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 1: Airborne sound insulation between rooms*. CEN.
- [11] EN ISO 12354-2 (2000). *Building Acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements – Part 2: Impact sound insulation between rooms*. CEN.
- [12] Mahn, Jeffrey (2009). *Prediction of flanking noise transmission in lightweight building constructions: A theoretical and experimental evaluation of the application of EN12354-1*, Tese de Douturamento. Universidade de Canterbury.
- [13] Ramis, Jaime; Segovia, Enrique; Alba, Jesús; Carbajo, Jesús; Godinho, Luís (2012). *Numerical evaluation of the vibration reduction index for structural joints*. Archives of Acoustics.
- [14] Shoenwald, Stefan (2012). *Comparison of proposed methods to include lightweight framed structures in EN 12354 prediction model*. Euronoise.
- [15] Guigou-Carter, Catherine; Villot, Michel; Wetta, Roland (2006). *Prediction method adapted to wood frame lightweight constructions*. Building Acoustics.
- [16] Villot, Michel; Guigou-Carter, Catherine (2006). *Measurement methods adapted to wood frame lightweight constructions*. Building Acoustics.
- [17] Shoenwald, Stefan (2008). *Flanking sound transmission through lightweight framed double leaf walls : prediction using statistical energy analysis*. Universidade Técnica de Eindhoven.
- [18] Gerretsen, Eddy (2005). *Development and use of prediction models in building acoustics as in EN 12354*. Proceedings of Forum Acusticum.
- [19] Gerretsen, Eddy (2015). *Extending EN 12354 sound insulation modelling to composed, light*

weight building systems. Proceedigs of Inter Noise.

[20] Metzen Heinrich (1999). *Accuracy of CEN-prediction models applied to German building situations*. Building Acoustics.

[21] Craik Robert (2001). *The contribution of long flanking paths to sound transmission in buildings*. Applied Acoustics.

[22] Galbrun Laurent (2008). *The prediction of airborne sound transmission between two rooms using first-order flanking paths*. Applied Acoustics.

[23] Nightingale T.R.T.; Bosmans, Ian (1999). *Vibration response of lightweight wood frame building elements*. Building Acoustics.

[24] Schneider M., Fischer H-M. (2005). *Flanking transmission of masonry building elements with flexible interlayer*. Forum Acusticum.

[25] Hopkins, Carl (2004). *Airborne sound insulation of beam and block floors: direct and flanking transmission*. Applied Acoustics.

[26] Martína, M.A. [et al.] (2004). *Sound Flanking Transmission: Assessment by a Slit Method*. Building Acoustics.

[27] Churchill, Claire; Hopkins, Carl (2016). *Prediction of airborne sound transmission across a timber–concrete composite floor using Statistical Energy Analysis*. Applied Acoustics.

[28] Poblet-Puig, Jordi (2016). *A modal-spectral model for flanking transmissions*. Journal of Sound and Vibration.

[29] António, Julieta; Mateus, Diogo (2015). *Influence of low frequency bands on airborne and impact sound insulation single numbers for typical Portuguese buildings*. Applied Acoustics.

[30] Queirós, Dóris; Calejo Rodrigues, Rui; Pereira, Nélson (2016). *Historical building acoustical retrofit: An experimental examination of traditional wooden floors*. Building Acoustics.

[31] Martins, João (2008). *Acústica de edifícios: validação experimental do cálculo de transmissões marginais a sons aéreos em edifícios*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

[32] Silva, Rogério (2015). *Caracterização acústica de pavimentos da casa burguesa portuense*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

[33] Sousa, Artur (2016). *Caracterização acústica de pavimentos de madeira na perspectiva da reabilitação urbana*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

[34]

<http://ars.els-cdn.com/content/image/1-s2.0-S0003682X07001454-gr1.jpg>. Acedido a 4 de Fevereiro de 2017.

[35]

http://vibrationacoustics.asmedigitalcollection.asme.org/data/journals/jvacek/28918/021009_1_2.jpeg. Acedido a 7 de Abril de 2017.

[36]

http://vibrationacoustics.asmedigitalcollection.asme.org/data/journals/jvacek/28918/021009_1_1.jpeg. Acedido a 7 de Abril de 2017.

- [37] EN ISO 10848-1 (2006). *Acoustics – Laboratory measurement of the flanking transmission of airborne and impact sound between adjoining rooms*. International Organization of Standardization.
- [38] EN ISO 10140-2 (2010). *Acoustics – Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Measurement of airborne sound insulation*. International Organization of Standardization.
- [39] Teixeira, Joaquim (2004). *Descrição do sistema construtivo da casa burguesa do Porto entre os séculos XVII e XIX*. Faculdade de Arquitetura da Universidade do Porto.
- [40] <https://us.123rf.com/450wm/isaxar/isaxar1501/isaxar150100004/35446054-portugal-old-porto-and-traditional-boat--vector-illustration.jpg?ver=6>. Acedido a 20 de Abril de 2017.
- [41] Calejo Rodrigues, Rui; Queirós, Dóris (2013). *Comportamento Acústico de Edifícios com Valor Patrimonial*. Gequaltec, Porto.
- [42] <https://coisasdaarquitetura.files.wordpress.com/2010/06/tesoura-romana-e1277164421460.jpg>. Acedido a 18 de Abril de 2017.
- [43] <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/736x/bd/22/d8/bd22d8e3bbf8e534347bcec6268b6784.jpg>. Acedido a 27 de Junho de 2017.
- [44] NP EN ISO 16283-1 (2014). *Acústica – Medição in situ do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção – Parte 1: Isolamento a sons de condução aérea*. Instituto Português de Qualidade.
- [45] EN ISO 3382-1 (2009). *Acoustics – Measurement of room acoustic parameters. Performance spaces*. International Organization of Standardization.